

(51) Int.Cl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	テ-マコ-ト <sup>*</sup> (参考)
G 0 3 H 1/26		G 0 3 H 1/26	2 K 0 0 8
G 1 1 C 13/04		G 1 1 C 13/04	C 5 B 0 0 3
17/00	5 8 0	17/00	5 8 0 C

## 審査請求 未請求 請求項の数19 O.L (全 24 頁)

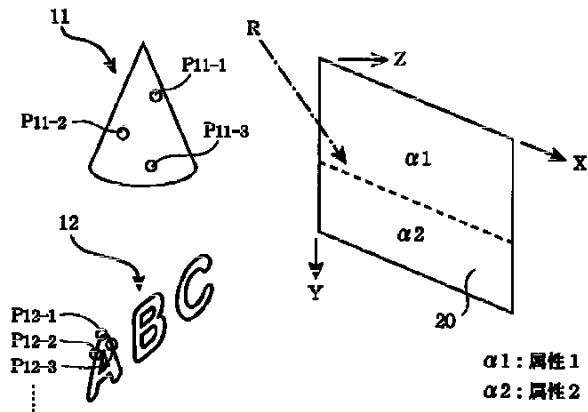
(21)出願番号	特願2001-383338(P2001-383338)	(71)出願人	000002897 大日本印刷株式会社 東京都新宿区市谷加賀町一丁目1番1号
(22)出願日	平成13年12月17日 (2001.12.17)	(72)発明者	北村 満 東京都新宿区市谷加賀町一丁目1番1号 大日本印刷株式会社内
		(72)発明者	浜野 智恒 東京都新宿区市谷加賀町一丁目1番1号 大日本印刷株式会社内
		(74)代理人	100091476 弁理士 志村 浩 Fターム(参考) 2K008 AA13 CC01 FF07 FF27 5B003 AA09 AC06 AD03

## (54)【発明の名称】 計算機プログラムの作成方法およびプログラム記録媒体

## (57)【要約】

【課題】 マイクロ文字を含む原画像についての干渉演算負担を軽減する。

【解決手段】 肉眼認識可能な原画像11と肉眼認識不能な原画像12(マイクロ文字)とを定義し、原画像11上には低密度で、原画像12上には高密度で、サンプルとなる点光源Pを定義する。原画像11上の点光源からの物体光と参照光Rとの干渉縞を記録面20上の領域 $\alpha_1$ 内の各演算点について求め、原画像12上の点光源からの物体光と参照光Rとの干渉縞を記録面20上の領域 $\alpha_2$ 内の各演算点について求める。サンプルとなる点光源は、原画像11, 12を、所定間隔で配置された多数の切断面(XZ平面に平行)により切断して得られる切断線上に所定ピッチで定義する。原画像12についての切断面間隔を、原画像11についての切断面間隔よりも細かく設定する。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 計算機を用いた演算により所定の記録面上に干渉縞を形成してなる計算機プログラムを作成する方法であつて、複数K個の原画像と、これら原画像を記録するための記録面と、この記録面に対して照射する参照光とを定義する段階と、

前記各原画像上にそれぞれ多数のサンプル光源を定義し、前記記録面上に多数の演算点を定義し、個々の演算点について、全部もしくは一部のサンプル光源から発せられた物体光と前記参照光とによって形成される干渉波の強度を演算により求め、求めた強度分布からなる干渉縞を、前記K個の原画像についてのホログラムとして前記記録面上に形成する段階と、

を有し、少なくとも2つの異なる原画像上に定義されるサンプル光源の空間的密度が、互いに異なるような設定を行うことを特徴とする計算機プログラムの作成方法。

【請求項2】 計算機を用いた演算により所定の記録面上に光学パターンを形成してなる計算機プログラムを作成する方法であつて、

複数K個の原画像と、これら原画像を記録するための記録面と、を定義する段階と、

前記各原画像上にそれぞれ多数のサンプル光源を定義し、前記記録面上に多数の演算点を定義し、個々の演算点について、全部もしくは一部のサンプル光源から発せられた物体光の当該演算点位置における複素振幅を演算することにより、個々の演算点に特定振幅および特定位相を定義し、個々の演算点近傍に、前記特定振幅および特定位相に応じた光学的特性を有する物理セルを配置し、前記物理セルの集合によってホログラム記録面を形成する段階と、

を有し、少なくとも2つの異なる原画像上に定義されるサンプル光源の空間的密度が、互いに異なるような設定を行うことを特徴とする計算機プログラムの作成方法。

【請求項3】 請求項1または2に記載の計算機プログラムの作成方法において、

記録面を複数の領域に分割し、個々の領域にはK通りの属性のうちのいずれか1つの属性を定義し、第k番目( $k = 1 \sim K$ )の属性が定義された領域内の演算点については、第k番目の原画像のサンプル光源から発せられた物体光のみを考慮して、干渉波の強度演算もしくは物体光の複素振幅演算を行うことを特徴とする計算機プログラムの作成方法。

【請求項4】 請求項3に記載の計算機プログラムの作成方法において、

光学パターンを記録する必要のない領域については無属性を定義し、この無属性が定義された領域内については、演算を行わないことを特徴とする計算機プログラムの作成方法。

【請求項5】 請求項3または4に記載の計算機プログ

ラムの作成方法において、

個々のサンプル光源から発せられる物体光の広がり角を所定角度に制限することにより、第k番目の原画像上のサンプル光源から発せられる物体光が第k番目の属性をもつ領域内にのみ届く条件設定を行い、干渉波の強度演算もしくは物体光の複素振幅演算を行うことを特徴とする計算機プログラムの作成方法。

【請求項6】 請求項5に記載の計算機プログラムの作成方法において、

記録面をXY平面上に配置し、点光源として定義された各サンプル光源からZ軸方向に向けて発せられる物体光について、X軸方向の広がり角 $\theta_x$ とY軸方向の広がり角 $\theta_y$ とを定義した制限を行うことを特徴とする計算機プログラムの作成方法。

【請求項7】 請求項1～6のいずれかに記載の計算機プログラムの作成方法において、

所定間隔を保ちながら互いに平行になるように配置された複数の切断面を定義し、原画像の表面を前記各切断面によって切断することにより得られる切断線上に所定間隔で並んだサンプル光源を定義するようにし、原画像ごとに前記切断面の間隔を変えることによりサンプル光源の空間的密度を変えるようにしたことを特徴とする計算機プログラムの作成方法。

【請求項8】 請求項7に記載の計算機プログラムの作成方法において、

記録面と各切断面とがそれぞれ所定の交線をもって交差するようにし、各交線にそれぞれ所定幅をもたせることにより短冊領域を形成し、第j番目の切断面によって得られる切断線上に並んだサンプル光源から発せられる物体光が、前記第j番目の切断面と前記記録面との交線について形成された短冊領域内にのみ到達するという条件下で、干渉波の強度演算もしくは物体光の複素振幅演算を行うことを特徴とする計算機プログラムの作成方法。

【請求項9】 請求項8に記載の計算機プログラムの作成方法において、

短冊領域の幅を切断面の間隔よりも小さく設定し、記録面上に短冊領域が定義されていない空隙領域が形成されるようにし、前記空隙領域については、隣接する短冊領域に関する干渉波の強度演算もしくは物体光の複素振幅演算の結果を複写して利用することを特徴とする計算機プログラムの作成方法。

【請求項10】 請求項1～9のいずれかに記載の計算機プログラムの作成方法において、

肉眼で認識可能な第1の原画像と肉眼で認識不能な第2の原画像とを定義し、前記第2の原画像上に定義するサンプル光源の空間的密度を、前記第1の原画像上に定義するサンプル光源の空間的密度よりも高く設定することを特徴とする計算機プログラムの作成方法。

【請求項11】 請求項10に記載の計算機プログラムの作成方法において、

第2の原画像を文字によって構成することを特徴とする計算機ホログラムの作成方法。

【請求項12】 請求項11に記載の計算機ホログラムの作成方法において、文字の最大寸法を300μm以下に設定することを特徴とする計算機ホログラムの作成方法。

【請求項13】 請求項10～12のいずれかに記載の計算機ホログラムの作成方法において、

所定間隔を保ちながら互いに平行になるように配置された複数の切断面を定義し、原画像の表面を前記各切断面によって切断することにより得られる切断線上に所定間隔で並んだサンプル光源を定義するようにし、

第1の原画像については、30μm以上の所定間隔で配置された切断面を用いてサンプル光源の定義を行い、第2の原画像については、30μm未満の所定間隔で配置された切断面を用いてサンプル光源の定義を行うことを特徴とする計算機ホログラムの作成方法。

【請求項14】 請求項1～13のいずれかに記載の計算機ホログラムの作成方法によって作成されたホログラム光学パターンを記録したホログラム記録媒体。

【請求項15】 複数の原画像が記録されているホログラム記録媒体において、各原画像ごとに、それぞれ別個の異なる記録領域に情報が記録されており、個々の記録領域には、記録対象となる原画像上に定義された多数のサンプル光源から発せられた物体光の情報が記録されており、かつ、少なくとも2つの異なる原画像上のサンプル光源の空間的密度が、互いに異なっていることを特徴とするホログラム記録媒体。

【請求項16】 請求項15に記載のホログラム記録媒体において、

肉眼で認識可能な第1の原画像と肉眼で認識不能な第2の原画像とが記録されており、前記第2の原画像上のサンプル光源の空間的密度が、前記第1の原画像上のサンプル光源の空間的密度よりも高いことを特徴とするホログラム記録媒体。

【請求項17】 請求項15または16に記載のホログラム記録媒体において、

第1の記録領域には、30μm以上の所定間隔をもって互いに平行になるように配置された複数の平面上に定義されたサンプル光源群によって表現される第1の原画像が記録されており、

第2の記録領域には、30μm未満の所定間隔をもって互いに平行になるように配置された複数の平面上に定義されたサンプル光源群によって表現される第2の原画像が記録されていることを特徴とするホログラム記録媒体。

【請求項18】 請求項16または17に記載のホログラム記録媒体において、

第2の原画像が最大寸法300μm以下の文字によって

構成されていることを特徴とするホログラム記録媒体。

【請求項19】 複数の原画像が記録されているホログラム記録媒体において、同一矩形からなる短冊領域を多数並べることにより記録面が構成されており、各短冊領域内には所定の光学パターンが記録されており、かつ、同一の光学パターンが記録されている短冊領域が所定数だけ連続的に繰り返し配置されており、

各原画像ごとに、それぞれ別個の異なる記録領域に情報が記録されており、同一の光学パターンが記録された短冊領域の連続数が、少なくとも2つの異なる記録領域について互いに異なっていることを特徴とするホログラム記録媒体。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明はホログラム記録媒体およびその作成方法に関し、特に、計算機を用いた演算により所定の記録面上に光学パターンを形成してなる計算機ホログラムを作成する方法およびその記録媒体に関する。

【0002】

【従来の技術】近年、レーザを利用してコヒーレント光を容易に得ることができるようになり、ホログラムの商業的な利用もかなり普及するに至っている。特に、金券やクレジットカードについては、偽造防止の観点から、媒体の一部にホログラムを形成するのが一般化している。

【0003】現在、商業的に利用されているホログラムは、光学的な手法により、原画像を媒体上に干渉縞として記録したものである。すなわち、原画像を構成する物体を用意し、この物体からの光と参照光とを、レンズなどの光学系を用いて感光剤が塗布された記録面上に導き、この記録面上に干渉縞を形成させるという手法を採っている。この光学的な手法は、鮮明な再生像を得るために、かなり精度の高い光学系を必要とするが、ホログラムを得るための最も直接的な手法であり、産業上では最も広く普及している手法である。

【0004】一方、計算機を用いた演算により記録面上に干渉縞を形成させ、ホログラムを作成する手法も知られており、このような手法で作成されたホログラムは、一般に「計算機合成ホログラム（CGH：Computer Generated Hologram）」、あるいは単に「計算機ホログラム」と呼ばれている。この計算機ホログラムは、いわば光学的な干渉縞の生成プロセスをコンピュータ上でシミュレーションすることにより得られるものであり、干渉縞パターンを生成する過程は、すべてコンピュータ上の演算として行われる。このような演算によって干渉縞パターンの画像データが得られたら、この画像データに基づいて、実際の媒体上に物理的な干渉縞が形成される。具体的には、たとえば、コンピュータによって作成され

た干渉縞パターンの画像データを電子線描画装置に与え、媒体上で電子線を走査することにより物理的な干渉縞を形成する方法が実用化されている。

【0005】コンピュータグラフィックス技術の発展により、印刷業界では、種々の画像をコンピュータ上で取り扱うことが一般化しつつある。したがって、ホログラムに記録すべき原画像も、コンピュータを利用して得られた画像データとして用意することができれば便利である。このような要求に応えるためにも、計算機ホログラムを作成する技術は重要な技術になってきており、将来は光学的なホログラム作成手法に取って代わる技術になるであろうと期待されている。

#### 【0006】

【発明が解決しようとする課題】上述したように、現在、ホログラムの商業的な用途として、金券やクレジットカードなどの偽造防止手段としての用途が非常に重要である。すなわち、微小な干渉縞からなるホログラムのパターンは、通常の複写機では複写することができ難であり、複写による偽造を防止する役割を果たすことができる。しかしながら、複写機の性能の向上により、最近では、一般的なホログラムパターンであれば、ある程度の精度をもって複写することが可能になってきており、ホログラムを偽造防止手段として利用するためには、更なる工夫が必要になってきている。

【0007】このような課題を解決するために、たとえば、実用新案登録第2582847号公報には、最大寸法が300μm以下のマイクロ文字を回折格子パターンとして記録する手法が開示されている。回折格子パターンとして記録された微細なマイクロ文字は、現在の通常の複写機では複写することができないため、複写機を用いた偽造を防止する上では非常に効果的である。もっとも、300μm以下のマイクロ文字は、肉眼によって認識することができないため、記録されたマイクロ文字についての真贋判定は、ルーペなどで拡大して行うことになる。逆言すれば、ルーペや顕微鏡などを用いれば、マイクロ文字として記録されている真贋情報の内容を誰でも確認することができる。最近では、微細な回折格子を記録することができる装置が比較的安価に入手できるようになってきているため、マイクロ文字として記録されている真贋情報の内容を判読することができれば、回折格子記録装置を用いた偽造が行われるおそれが出てくる。

【0008】このように、回折格子を用いて真贋情報を記録する方法では、記録面に真贋情報が直接記録されることになるため、複製が行われやすい。これに対して、ホログラムパターンとして真贋情報を記録する方法では、記録面には干渉縞パターンが記録されるだけであり、真贋情報そのものが直接記録されるわけではないので、偽造防止の観点からは優れている。そこで、たとえば、特開平11-21793号公報には、通常の大きさ

の文字からなる実原画像を、光学的に縮小することにより、マイクロ文字のホログラムパターンとして記録する光学的なホログラムの作成方法が開示されている。

【0009】もちろん、このようなマイクロ文字を、計算機ホログラムの手法を利用して作成することも原理的には可能である。しかしながら、現在のところ、計算機ホログラムの商業的な利用には、大きな問題が存在する。それは、コンピュータに課せられる多大な演算負担である。高精度な再生像を得るためにには、原画像を多数の微小光源の集合として取り扱う必要があり、記録面上の各位置について、この全微小光源から発せられた物体光と参照光との干渉波の強度を演算する必要がある。肉眼では認識不能な微小なマイクロ文字を含むような原画像についての計算機ホログラムを作成するには、非常に高精細な演算を行う必要があり、コンピュータの演算負担はかなり大きなものになる。もちろん、演算処理能力の優れた超高速コンピュータを用いて、長時間にわたる演算を実行されれば、光学的なホログラムと同等の品質をもった計算機ホログラムを作成することは可能であるが、このような作成方法は商業的に利用することはできない。また、演算により作成される干渉縞パターンの情報をもった画像データの容量も膨大なものになり、電子線描画装置を用いて物理的な記録媒体上に干渉縞を形成する作業負担も膨大なものになる。

【0010】そこで本発明は、マイクロ文字などの微細なパターンを含む原画像についてのホログラムを演算により作成する場合に、コンピュータの演算負担を軽減させることができる計算機ホログラムの作成方法を提供することを目的とし、また、そのような方法で作成されたホログラム記録媒体を提供することを目的とする。

#### 【0011】

【課題を解決するための手段】(1) 本発明の第1の態様は、複数K個の原画像と、これら原画像を記録するための記録面と、この記録面に対して照射する参照光とを定義する段階と、各原画像上にそれぞれ多数のサンプル光源を定義し、記録面上に多数の演算点を定義し、個々の演算点について、全部もしくは一部のサンプル光源から発せられた物体光と参照光とによって形成される干渉波の強度を演算により求め、求めた強度分布からなる干渉縞を、K個の原画像についてのホログラムとして記録面上に形成する段階と、を行うことにより、計算機を用いた演算により所定の記録面上に干渉縞を形成してなる計算機ホログラムを作成する計算機ホログラムの作成方法において、少なくとも2つの異なる原画像上に定義されるサンプル光源の空間的密度が、互いに異なるような設定を行うようにしたものである。

【0012】(2) 本発明の第2の態様は、複数K個の原画像と、これら原画像を記録するための記録面と、を定義する段階と、各原画像上にそれぞれ多数のサンプル光源を定義し、記録面上に多数の演算点を定義し、個々

の演算点について、全部もしくは一部のサンプル光源から発せられた物体光の当該演算点位置における複素振幅を演算することにより、個々の演算点に特定振幅および特定位相を定義し、個々の演算点近傍に、それぞれの特定振幅および特定位相に応じた光学的特性を有する物理セルを配置し、これら物理セルの集合によってホログラム記録面を形成する段階と、を行うことにより、計算機を用いた演算により所定の記録面上に光学パターンを形成してなる計算機ホログラムを作成する計算機ホログラムの作成方法において、少なくとも2つの異なる原画像上に定義されるサンプル光源の空間的密度が、互いに異なるよう設定を行うようにしたものである。

【0013】(3) 本発明の第3の態様は、上述の第1または第2の態様に係る計算機ホログラムの作成方法において、記録面を複数の領域に分割し、個々の領域にはK通りの属性のうちのいずれか1つの属性を定義し、第k番目( $k=1 \sim K$ )の属性が定義された領域内の演算点については、第k番目の原画像のサンプル光源から発せられた物体光のみを考慮して、干渉波の強度演算もしくは物体光の複素振幅演算を行うようにし、第k番目の原画像の情報が、第k番目の属性が定義された領域内のみ記録されるようにしたものである。

【0014】(4) 本発明の第4の態様は、上述の第3の態様に係る計算機ホログラムの作成方法において、光学パターンを記録する必要のない領域については無属性を定義し、この無属性が定義された領域内については、演算を行わないようにし、光学パターンが形成されないようにしたものである。

【0015】(5) 本発明の第5の態様は、上述の第3または第4の態様に係る計算機ホログラムの作成方法において、個々のサンプル光源から発せられる物体光の広がり角を所定角度に制限することにより、第k番目の原画像上のサンプル光源から発せられる物体光が第k番目の属性をもつ領域内にのみ届く条件設定を行い、干渉波の強度演算もしくは物体光の複素振幅演算を行うようにしたものである。

【0016】(6) 本発明の第6の態様は、上述の第5の態様に係る計算機ホログラムの作成方法において、記録面をXY平面上に配置し、点光源として定義された各サンプル光源からZ軸方向に向けて発せられる物体光について、X軸方向の広がり角 $\theta_x$ とY軸方向の広がり角 $\theta_y$ とを定義した制限を行うようにしたものである。

【0017】(7) 本発明の第7の態様は、上述の第1～第6の態様に係る計算機ホログラムの作成方法において、所定間隔を保ちながら互いに平行になるように配置された複数の切断面を定義し、原画像の表面を各切断面によって切断することにより得られる切断線上に所定間隔で並んだサンプル光源を定義するようにし、原画像ごとに切断面の間隔を変えることによりサンプル光源の空間的密度を変えるようにしたものである。

【0018】(8) 本発明の第8の態様は、上述の第7の態様に係る計算機ホログラムの作成方法において、記録面と各切断面とがそれぞれ所定の交線をもって交差するようにし、各交線にそれぞれ所定幅をもたせることにより短冊領域を形成し、第j番目の切断面によって得られる切断線上に並んだサンプル光源から発せられる物体光が、第j番目の切断面と記録面との交線について形成された短冊領域内にのみ到達するという条件下で、干渉波の強度演算もしくは物体光の複素振幅演算を行うようにしたものである。

【0019】(9) 本発明の第9の態様は、上述の第8の態様に係る計算機ホログラムの作成方法において、短冊領域の幅を切断面の間隔よりも小さく設定し、記録面上に短冊領域が定義されていない空隙領域が形成されるようにし、この空隙領域については、隣接する短冊領域に関する干渉波の強度演算もしくは物体光の複素振幅演算の結果を複写して利用するようにしたものである。

【0020】(10) 本発明の第10の態様は、上述の第1～第9の態様に係る計算機ホログラムの作成方法において、肉眼で認識可能な第1の原画像と肉眼で認識不能な第2の原画像とを定義し、第2の原画像上に定義するサンプル光源の空間的密度を、第1の原画像上に定義するサンプル光源の空間的密度よりも高く設定するようにしたものである。

【0021】(11) 本発明の第11の態様は、上述の第10の態様に係る計算機ホログラムの作成方法において、第2の原画像を文字によって構成するようにしたものである。

【0022】(12) 本発明の第12の態様は、上述の第11の態様に係る計算機ホログラムの作成方法において、文字の最大寸法を $300 \mu\text{m}$ 以下に設定するようにしたものである。

【0023】(13) 本発明の第13の態様は、上述の第10～第12の態様に係る計算機ホログラムの作成方法において、所定間隔を保ちながら互いに平行になるように配置された複数の切断面を定義し、原画像の表面を各切断面によって切断することにより得られる切断線上に所定間隔で並んだサンプル光源を定義するようにし、第1の原画像については、 $30 \mu\text{m}$ 以上の所定間隔で配置された切断面を用いてサンプル光源の定義を行い、第2の原画像については、 $30 \mu\text{m}$ 未満の所定間隔で配置された切断面を用いてサンプル光源の定義を行うようにしたものである。

【0024】(14) 本発明の第14の態様は、上述の第1～第13の態様に係る計算機ホログラムの作成方法によって作成されたホログラム光学パターンを、電子線描画装置によって描画された原版、この原版を用いて作成された複製物、この複製物に反射層などを成膜してなる媒体、などのホログラム記録媒体上に記録するようにしたものである。

【0025】(15) 本発明の第15の態様は、複数の原画像を記録してなるホログラム記録媒体において、各原画像ごとに、それぞれ別個の異なる記録領域に情報が記録されており、個々の記録領域には、記録対象となる原画像上に定義された多数のサンプル光源から発せられた物体光の情報が記録されており、かつ、少なくとも2つの異なる原画像上のサンプル光源の空間的密度が、互いに異なっているようにしたものである。

【0026】(16) 本発明の第16の態様は、上述の第15の態様に係るホログラム記録媒体において、肉眼で認識可能な第1の原画像と肉眼で認識不能な第2の原画像とが記録されており、第2の原画像上のサンプル光源の空間的密度が、第1の原画像上のサンプル光源の空間的密度よりも高くなるようにしたものである。

【0027】(17) 本発明の第17の態様は、上述の第15または第16の態様に係るホログラム記録媒体において、第1の記録領域には、30μm以上の所定間隔をもって互いに平行になるように配置された複数の平面上に定義されたサンプル光源群によって表現される第1の原画像が記録されており、第2の記録領域には、30μm未満の所定間隔をもって互いに平行になるように配置された複数の平面上に定義されたサンプル光源群によって表現される第2の原画像が記録されているようにしたものである。

【0028】(18) 本発明の第18の態様は、上述の第16または第17の態様に係るホログラム記録媒体において、第2の原画像を、最大寸法300μm以下の文字によって構成するようにしたものである。

【0029】(19) 本発明の第19の態様は、複数の原画像が記録されているホログラム記録媒体において、同一矩形からなる短冊領域を多数並べることにより記録面が構成されており、各短冊領域内には所定の光学パターンが記録されており、かつ、同一の光学パターンが記録されている短冊領域が所定数だけ連続的に繰り返し配置されており、各原画像ごとに、それぞれ別個の異なる記録領域に情報が記録されており、同一の光学パターンが記録された短冊領域の連続数が、少なくとも2つの異なる記録領域について互いに異なっているようにしたものである。

### 【0030】

【発明の実施の形態】以下、本発明を図示する実施形態に基いて説明する。

#### 【0031】§1. 本発明の基本原理

図1は、一般的なホログラムの作成方法を示す原理図であり、原画像10を記録面20上に干渉縞として記録する方法が示されている。ここでは、説明の便宜上、図示のとおりXYZ三次元座標系を定義し、記録面20がX-Y平面上に置かれているものとする。光学的な手法を採る場合、実際の物体あるいはその実像や虚像が原画像10として用意されることになる。この原画像10上の任

意の点Pから発せられた物体光Oは、記録面20の全面に向けて進行する。一方、記録面20には、参照光Rが照射されており、物体光Oと参照光Rとの干渉縞が記録面20上に記録されることになる。

【0032】記録面20の位置に計算機ホログラムを作成するには、原画像10、記録面20、参照光Rを、コンピュータ上にデータとしてそれぞれ定義し、記録面20上の各位置における干渉波強度を演算すればよい。具体的には、図2に示すように、原画像10をN個のサンプル光源P1, P2, P3, …, Pi, …, PNの集合として取り扱い、各サンプル光源からの物体光O1, O2, O3, …, Oi, …, ONが、それぞれ演算点Q(x, y)へと進行するとともに、参照光Rが演算点Q(x, y)に向けて照射されたものとし、これらN本の物体光O1～ONと参照光Rとの干渉によって生じる干渉波の演算点Q(x, y)の位置における振幅強度を求める演算を行えばよい。なお、ここでは、サンプル光源Pとして、物体光が球面波として伝達される点光源を用いているが、線光源や微小な面光源をサンプル光源として用いてもかまわない。また、各サンプル光源Pは、必ずしも自ら発光している必要はなく、何らかの照明光を反射することにより物体光を発する性質をもっていればよい。通常、原画像10は多数のポリゴンの集合体として定義され、個々のポリゴンごとに三次元空間上での向きや反射率などが定義されるので、所定の照明環境を定義してやれば、原画像10上の任意の点からの反射光として、物体光を定義することができる。

【0033】一方、記録面20上には、必要な解像度に応じた多数の演算点を定義するようにし、これら各演算点のそれについて、振幅強度を求める演算を行えば、記録面20上には干渉波の強度分布が得られることになる。ここで述べる実施形態の場合、記録面20上に、X軸方向に0.6μmのピッチで、Y軸方向に0.25μmのピッチで、マトリックス状に並んだ多数の演算点Q(x, y)を定義し、各演算点ごとに干渉縞の振幅強度値を求めている。記録面20上に定義する演算点のピッチは、必ずしも上述の値に限定されるものではないが、ホログラム再生像を得るために干渉縞を記録するためには、光の波長域に応じた微細なピッチで多数の演算点が定義されている必要がある。

【0034】結局、記録面20上には、演算点の配置解像度（上述の例の場合、X軸方向：0.6μm, Y軸方向：0.25μm）に応じた干渉縞パターンの強度分布が得られることになり、このような強度分布は二次元平面上の画像データとして表現されることになる。そこで、この画像データに基づいて、媒体上に物理的な干渉縞（物理的な濃淡パターンやエンボスパターン）を作成すれば、計算機ホログラムが作成できる。媒体上に高解像度の干渉縞を形成する手法としては、電子線描画装置を用いた描画が適している。電子線描画装置は、半導体

集積回路のマスクパターンを描画する用途などに広く利用されており、電子線を高精度で走査する機能を有している。そこで、演算によって求めた干渉波の強度分布を示す画像データを電子線描画装置に与えて電子線を走査すれば、この強度分布に応じた干渉縞パターンを描画することができる。

【0035】ただ、一般的な電子線描画装置は、描画／非描画を制御することにより二値画像を描画する機能しか有していないので、通常は、演算によって求めた強度分布を二値化して二値画像を作成し、この二値画像データを電子線描画装置に与える手法が採られる。すなわち、上述した演算により、記録面20上の各演算点Q(x, y)には、所定の振幅強度値が定義されることになるので、この振幅強度値に対して所定のしきい値（たとえば、記録面20上に分布する全振幅強度値の平均値）を設定し、このしきい値以上の強度値をもつ演算点には画素値「1」を与え、このしきい値未満の強度値をもつ演算点には画素値「0」を与えるようにし、各演算点Q(x, y)を、「1」もしくは「0」の画素値をもつ画素D(x, y)に変換すれば、多数の画素D(x, y)の集合からなる二値画像が得られる。この二値画像のデータを電子線描画装置に与えて描画を行えば、物理的な二値画像として干渉縞を描画することができる。実際には、この物理的に描画された干渉縞に基づいて、たとえば原版となるエンボス版を作成し、このエンボス版を用いたエンボス加工を行うことにより、表面に干渉縞が凹凸構造として形成されたホログラムを量産することができる。

【0036】本発明は、もともと、マイクロ文字を含む原画像を演算によりホログラムパターンとして記録するための手法として開発されたものである。既に述べたように、金券やクレジットカードなどの偽造防止手段として、マイクロ文字のような肉眼で認識不能な微小な原画像が記録されたホログラム記録媒体は非常に有効である。ただ、実用上は、金券やクレジットカードなどの偽造防止用シールには、肉眼では認識不能なマイクロ文字とともに、肉眼で認識可能な通常の大きさの原画像も併せて記録するようにし、肉眼による真贋判断と、ルーペや顕微鏡などによる真贋判断との双方が可能になるようになるのが好ましい。

【0037】図3は、肉眼で認識可能な通常の大きさの原画像11と、肉眼では認識不能なマイクロ文字からなる原画像12とを、計算機ホログラムの手法を用いて記録面20上に記録する方法を示す原理図である。この図では、説明の便宜上、原画像11も原画像12もほぼ同じ大きさに描かれているが、実際には、両原画像の大きさはかなり違っている。すなわち、この例では、原画像11は、たとえば高さ10mmほどの単純な円錐形の立体像であり、肉眼によって十分に認識可能な立体像となっている。これに対して原画像12は、「ABC」なる

3文字から構成される平面像（もちろん、厚みをもった立体像を用いてもかまわない）であり、いずれも高さが200μm程度のマイクロ文字になっている。一般に、最大寸法が300μm以下のマイクロ文字は、肉眼によって認識することができず、原画像12を構成する文字は、肉眼では文字として認識することはできない。

【0038】このように、肉眼観察可能な原画像11と肉眼観察不能な原画像12との双方を記録面20上にホログラムパターンとして記録しておけば、再生時には、これら両原画像が三次元画像として再生されることになる（原画像12自体は平面的な文字であるが、三次元空間上に配置された文字として再生される）。したがって、このような記録面20上のホログラムパターンを物理的な記録媒体上に形成し、クレジットカードなどの偽造防止シールとして利用すれば、通常は、原画像11を肉眼で観察することにより簡便な真贋判定を行うことができ、必要に応じて、ルーペや顕微鏡を用いて原画像12を観察することにより、より正確な真贋判定を行うことができる。

【0039】前述のように、実際に計算機ホログラムを作成する演算を行うには、原画像上に多数のサンプル光源を定義する必要があるが、このサンプル光源の数が増えれば増えるほど、演算負担は累積的に増大し、演算結果として得られるデータの容量も膨大なものになる。しかしながら、マイクロ文字からなる原画像12を記録するためには、それなりの高い密度でサンプル光源を定義しなければ、十分な解像度をもった再生像を得ることができない。本発明の基本的発想は、個々の原画像ごとに、定義すべきサンプル光源の空間的密度を異ならせるようにし、高い解像度をもって記録する必要がある原画像12については、高密度でサンプル光源を定義し、高い解像度をもって記録する必要のない原画像11については、低密度でサンプル光源を定義する、という考え方にある。たとえば、図3の例では、原画像11上には、サンプル光源P11-1, P11-2, P11-3なる3つのサンプル光源が定義されている状態が示されている（もちろん、実際には、円錐形状の原画像11を記録するためには、より多数のサンプル光源が必要である）。これに対して、原画像12上には、より高い空間的密度で、サンプル光源P12-1, P12-2, ……が定義されている状態が示されている。前述したように、原画像11は、高さ10mm程度の円錐形であるので、そのような立体图形の肉眼認識に必要な解像度でサンプル光源を定義すれば十分であるのに対し、原画像12は、最大寸法200μm程度のマイクロ文字であるので、ルーペなどの拡大手段を用いて観察したときに、微細な形状情報が認識可能になるような高い解像度でサンプル光源を定義する必要がある。

【0040】本発明に係る計算機ホログラムの作成方法の基本的な手順自体は、従来の計算機ホログラムの作成

方法の手法とほとんど同じである。すなわち、図3に示す例において、複数の原画像11, 12を示すデータが作成され、各原画像11, 12上に多数のサンプル光源が定義され、記録面20が定義され、この記録面20上に多数の演算点Q(x, y)が定義され、記録面20に対して照射する参照光Rが定義される。そして、個々の演算点Q(x, y)について、各サンプル光源から発せられた物体光と参照光Rによって形成される干渉波の強度を演算により求め、求めた強度分布からなる干渉縞が記録面20上に形成されることになる。ただ、本発明では、複数の原画像11, 12上にサンプル光源を定義する際に、その空間的密度を異ならせるようにするのが特徴である。ここでは、2つの原画像11, 12を用いた例が示されているが、3つ以上の原画像を用いた場合も同様である。要するに、本発明では、複数K個の原画像を1枚の記録面20に記録する際に、少なくとも2つの異なる原画像上に定義されるサンプル光源の空間的密度が、互いに異なるような設定を行えばよい。

【0041】ホログラムの基本原理は、「原画像上の任意の1点の情報を、記録面上のすべての部分に記録する」という点にあり、このような基本原理に基いて原画像上の情報を記録することにより、再生時に三次元像が得られることになる。したがって、図3に示す例の場合、たとえば、原画像11上に点光源として定義されたサンプル光源P11-1の情報は、記録面20上のすべての演算点に干渉波の強度として記録され、同様に、原画像12上に点光源として定義されたサンプル光源P12-1の情報も、記録面20上のすべての演算点に干渉波の強度として記録されることになる。しかしながら、計算機ホログラムの手法を探る場合には、必ずしも上述の基本原理どおりの記録方法には拘束されない。種々の演算条件を設定することにより、上述の基本原理からは若干外れた方法で、原画像の記録を行うことも可能である。

【0042】たとえば、図4に示すように、記録面20を上部領域 $\alpha_1$ と下部領域 $\alpha_2$ に分割し、上部領域 $\alpha_1$ には、原画像11に関する情報を記録し、下部領域 $\alpha_2$ には、原画像12に関する情報を記録する、ということも可能である。具体的には、上部領域 $\alpha_1$ 内の演算点についての干渉波の強度演算を行う際には、原画像11上のサンプル光源からの物体光のみを考慮した演算を行い、下部領域 $\alpha_2$ 内の演算点についての干渉波の強度演算を行う際には、原画像12上のサンプル光源からの物体光のみを考慮した演算を行えばよい。

【0043】このように、「原画像上の任意の1点の情報を、記録面上のすべての部分に記録する」というホログラムの基本原理から逸脱するような記録方法を探ると、記録面20上に得られたホログラムパターンからは、完全な三次元再生像は得られなくなる。具体的には、観察時の視野角が狭くなり、上方からの急角度ある

いは下方からの急角度から記録面20を観察した場合に、2つの原画像11, 12が正しく再生されなくなる。しかしながら、偽造防止などの用途に用いるホログラム記録媒体を作成する目的であれば、常に完全な三次元再生像が得られる必要はないので、実用上は大きな問題は生じない。

【0044】図4に示す例のように、記録面20を複数の領域 $\alpha_1, \alpha_2$ に分割し、上部領域 $\alpha_1$ には第1の原画像11の情報を記録し、下部領域 $\alpha_2$ には第2の原画像12の情報を記録する、という手法を採れば、演算負担を大幅に軽減させることができる。すなわち、上部領域 $\alpha_1$ 内の演算点についての演算では、原画像12上のサンプル光源からの物体光の考慮は不要になり、下部領域 $\alpha_2$ 内の演算点についての演算では、原画像11上のサンプル光源からの物体光の考慮は不要になる。しかも、本発明の場合、原画像11上のサンプル光源の空間的密度と、原画像12上のサンプル光源の空間的密度が異なっているため、図4に示す例のように、各原画像ごとに別個の領域に記録を行うようにすれば、サンプル光源を画一的に定義した演算が可能になり、この点においても、演算負担の軽減が図れる。たとえば、図3に示す例のように領域分割を行わないと、任意の演算点Q(x, y)についての演算を行う際に、サンプル光源を画一的に定義することはできないが、図4に示す例のように領域分割を行えば、上部領域 $\alpha_1$ 内の演算点についての演算を行う際には画一的なピッチ $\beta_1$ でサンプル光源を定義し、下部領域 $\alpha_2$ 内の演算点についての演算を行う際には画一的なピッチ $\beta_2$ でサンプル光源を定義し、というような取り扱いが可能になる。

【0045】結局、本発明を利用して、複数K個の原画像を記録面上に記録する場合、実用上は、記録面を複数の領域に分割し、個々の領域にはK通りの属性のうちのいずれか1つの属性を定義し、第k番目(k=1~K)の属性が定義された領域内の演算点については、第k番目の原画像のサンプル光源から発せられた物体光のみを考慮して、干渉波の強度演算を行うようにし、第k番目の原画像の情報が、第k番目の属性が定義された領域内にのみ記録されるようにするのが好ましい。図4に示す例の場合、上部領域 $\alpha_1$ には属性1が定義され、第1番目の原画像11の情報が記録されることになり、下部領域 $\alpha_2$ には属性2が定義され、第2番目の原画像12の情報が記録されることになる。

【0046】§2. より具体的な実施形態  
続いて、本発明をより具体的な実施形態に基いて説明する。ここでは、図5(a)に示すような円錐形をした原画像110と、図5(b)に示すように、画像平面120上に定義された9個の原画像121~129と、を同一の記録面20上に記録する場合を考えてみる。ここで、原画像110は、前述の例の原画像11と同様に、高さ10mm程度の肉眼認識可能な立体画像であり、原画像1

21～129は、前述の例の原画像12と同様に、高さが200μm程度の肉眼認識不能なマイクロ文字からなる平面画像であるものとする。そして、図6に示すように、XY平面上に記録面20を配置し(X軸は紙面に垂直方向)、その後方(図の左方向)に原画像110を配置し、更にその後方に原画像121～129が形成された画像平面120を配置する。

【0047】図7は、これらの原画像の配置を、記録面20側から見た正面図である。円錐形の原画像110は、画像平面120の手前に配置されており、画像平面120上に形成されたマイクロ文字からなる原画像121～129は、デザイン的には、いわば背景としての機能を果たしている。これらの原画像を記録面20上に記録した後、これを再生した場合にも、図7と同様の状態で各原画像が観察されることになる。もちろん、観察される再生像はホログラム再生像であり、三次元空間上の奥行きをもった像ということになり、観察する角度によって、原画像110と背景を構成する原画像121～129との位置関係は変化することになる。また、図5や図7では、説明の便宜上、原画像121～129を、認識可能な文字列として示しているが、実際には、これらの文字は肉眼では認識不能なマイクロ文字であり、肉眼で観察した場合には、ストライプ状の模様として観察されるだけである。

【0048】さて、結局、ここに示す実施形態の場合、合計10組の原画像110, 121～129を記録面20上に記録することになる。そのため、図8に示すように、記録面20上に10個の領域 $\alpha_1 \sim \alpha_{10}$ を定義し、これらの領域にそれぞれ属性1～10のうちのいずれかの属性を定義する。なお、図8における領域 $\alpha_0$ (10個の領域 $\alpha_1 \sim \alpha_{10}$ の外に位置する領域)は、干渉縞を記録する必要のない領域であり、この領域 $\alpha_0$ については無属性が定義される。属性1～10は、それぞれ原画像121～129, 110を示すパラメータであり、属性1が定義された領域 $\alpha_1$ には原画像121が記録され、属性2が定義された領域 $\alpha_2$ には原画像122が記録され、……、属性9が定義された領域 $\alpha_9$ には原画像129が記録され、更に、属性10が定義された領域 $\alpha_{10}$ には原画像110が記録されることになる。なお、属性5が定義された領域 $\alpha_5$ は、この例では、領域 $\alpha_{10}$ の陰に隠れてしまうために実際には存在しない領域となっている。

【0049】本発明に係る計算機ホログラムの作成方法では、図7に示すように、10個の原画像110、121～129を定義し、図8に示すように、記録面20上に10個の記録領域 $\alpha_1 \sim \alpha_{10}$ を定義したら、続いて、各原画像上にそれぞれ所定の空間的密度で多数のサンプル光源を定義する。このとき、原画像110は肉眼で認識可能な大きさの原画像であるため、低い密度でサンプル光源を定義し、原画像121～129は肉眼で認

識不能な大きさの原画像であるため、高い密度でサンプル光源を定義することになる。次に、記録面20に対して所定の参照光Rを定義し、記録面20上に多数の演算点を定義する。そして、各演算点について、それぞれ原画像から発せられる物体光と参照光との干渉波強度を求める演算を行う。ただし、各演算点についての演算を行う際には、当該演算点が属する領域の属性によって示された原画像上のサンプル光源からの物体光のみを考慮した演算を行うようとする。

【0050】たとえば、領域 $\alpha_1$ 内の演算点については、属性1によって示される原画像121上のサンプル光源からの物体光のみを考慮した演算が実行され、領域 $\alpha_{10}$ 内の演算点については、属性10によって示される原画像110上のサンプル光源からの物体光のみを考慮した演算が実行される。このため、領域 $\alpha_1 \sim \alpha_9$ 内の演算点に関しては、高い密度で定義された多数のサンプル光源についての演算が必要になるものの、領域 $\alpha_1 \sim \alpha_{10}$ 内の演算点に関しては、低い密度で定義されたサンプル光源についての演算ですみ、総合的な演算量を抑えることができる。なお、領域 $\alpha_0$ については、干渉波強度の演算自体が行われない。

【0051】かくして、各領域 $\alpha_1 \sim \alpha_{10}$ には、それぞれ所定の干渉縞パターンが求まることになる。なお、このように、記録面20上に各領域 $\alpha_1 \sim \alpha_{10}$ を定義して、1つの領域には1つの原画像に関する情報のみを記録するようにして形成された計算機ホログラムは、§1でも述べたとおり、厳密な意味では、本来のホログラムにはなっていない。すなわち、ホログラムの基本原理は、「原画像上の任意の1点の情報を、記録面上のすべての部分に記録する」という点にあり、上述のように、個々の領域ごとに特定の原画像の情報のみを記録する方法を探って作成されたホログラムでは、本来の三次元再生像を得ることができなくなる。具体的には、観察時の視野角が狭くなり、記録面20を斜め方向から観察したような場合に、正しい再生像が得られなくなる。しかしながら、前述したように、クレジットカードや金券の偽造防止マークとしての機能は十分に果たすことができるため、実用上は大きな支障は生じない。

【0052】なお、図8と図7を対比すればわかるように、記録面20上に定義された各領域 $\alpha_1 \sim \alpha_{10}$ の配置および形状は、図7に示す各原画像121～129, 110の配置および形状に近似している。このように、実用上は、記録面20上に定義する各領域の配置および個々の領域の形状は、原画像の記録面20上への投影像の配置および形状に近似させるように定義するのが好ましい。これは再生時に、各原画像の空間的な位置関係が、もとの原画像の空間的な位置関係と同様に観察されるようにするためである。無属性となっている領域 $\alpha_0$ には、何ら干渉縞パターンは記録されていないため、領域 $\alpha_0$ は再生像の形成には何ら関与しない。

【0053】ところで、上述の例では、「ABC」なる文字列を1つの原画像として捉え、図7に示す例では、合計10個の原画像110, 121~129が存在する旨の説明を行ったが、本発明における「1つの原画像」とは、恣意的な定義であり、1文字1文字をそれぞれ1つの原画像として捉えることもできるし、より多数の文字列からなる一群の文字列を1つの原画像として捉えることもできる。たとえば、図9は、「ABC」なる文字列を横方向に3組並べてなる一群の文字列を1つの原画像として捉えた例であり、この例では、画像平面130上に、3つの原画像131, 132, 133が用意されているものとして取り扱うことができる。

【0054】図10は、この図9に対応した領域定義の一例を示すものであり、記録面20上には、5つの領域 $\alpha_1$ ~ $\alpha_5$ が定義されている（他に無属性の領域 $\alpha_0$ が存在する）。領域 $\alpha_1$ には属性1が与えられており、第1の原画像131の情報が記録されることになる。また、領域 $\alpha_2$ および $\alpha_3$ には属性2が与えられており、第2の原画像132の情報が記録され、領域 $\alpha_4$ には属性3が与えられており、第3の原画像133の情報が記録され、領域 $\alpha_5$ には属性4が与えられており、第4の原画像110の情報が記録される。この図10に示す領域定義により得られたホログラムは、図8に示す領域定義により得られたホログラムより、水平方向（X軸方向）に関する視野角が広がるというメリットを有している。たとえば、図10の領域 $\alpha_1$ には、図9に示す原画像131、すなわち、水平方向に並んだ3組の「ABC」なる文字列の情報が記録されているため、図の右もしくは左方向に傾斜した方向から観察した場合でも、本来の三次元再生像が得られるようになる。しかしながら、この $\alpha_1$ 内のすべての演算点に関する演算は、原画像131上のすべてのサンプル光源からの物体光を考慮した演算になるため、演算負担は大きくならざるを得ない。

【0055】このように、本発明において、全記録対象物のうち、どの部分を「1つの原画像」として取り扱うかは、任意に決定することができる事項である。したがって、たとえば、人間の顔からなる原画像のうち、髪の毛の部分を第1の原画像として高い密度でサンプル光源を定義し、その他の部分を第2の原画像として低い密度でサンプル光源を定義する、ということも可能である。

### 【0056】§3. 領域およびサンプル光源の具体的定義方法

上述した実施形態では、図8あるいは図10に示すように、記録面20を複数の領域に分割し、個々の領域にはK通りの属性のうちのいずれか1つの属性もしくは無属性を定義し、第k番目（ $k=1$ ~ $K$ ）の属性が定義された領域内の演算点については、第k番目の原画像のサンプル光源から発せられた物体光のみを考慮した干渉波の強度演算を行っている。ここでは、この記録面20上で

の領域定義の具体的な方法を述べることにする。

【0057】既に、§2の実施形態で説明したように、記録面20上の領域は、原画像の配置および形状に応じた定義がなされるようになるのが好ましい。たとえば、図8に示す領域 $\alpha_1$ ~ $\alpha_10$ は、図7に示す原画像121~129, 110に応じた配置および形状になっている。このような領域定義は、実は、原画像上に定義された個々のサンプル光源から発せられる物体光の広がり角度を所定角度に制限することにより、容易に行うことが可能である。このような広がり角の制限により、第k番目の原画像上のサンプル光源から発せられる物体光は、第k番目の属性をもつ領域内にのみ届く条件設定が可能になる。

【0058】たとえば、図11に示すように、XY平面上に記録面20を定義し（X軸は紙面に垂直な方向）、その後方（図の左方向）に配置された原画像10の情報を、この記録面20上に記録することを考える。この場合、原画像10上に定義された第i番目のサンプル光源 $P_i$ が点光源であるとすれば、本来、このサンプル光源 $P_i$ から発せられた物体光は球面波となり、記録面20の全面に到達するはずである。しかしながら、ここで、このサンプル光源 $P_i$ から発せられた物体光のY軸方向の広がり角を、図11に示すように、記録面20に下した垂線（Z軸に平行）を中心として角 $\theta_y$ となるように制限したとすると、サンプル光源 $P_i$ からの物体光は、記録面20上の幅 $L_y$ の部分にしか到達しなくなる。同様に、この物体光のX軸方向の広がり角を角 $\theta_x$ に制限すれば、結局、図12に示すように、サンプル光源 $P_i$ からの物体光は、記録面20上における単位領域 $U_i$ の部分にしか到達しなくなる。この場合、単位領域 $U_i$ は、図にハッチングを施して示すように、X軸方向の長さが $L_x$ 、Y軸方向の長さが $L_y$ の矩形領域になる。

【0059】このように、記録面20をXY平面上に配置し、点光源として定義された各サンプル光源からZ軸方向に向けて発せられる物体光について、X軸方向の広がり角 $\theta_x$ とY軸方向の広がり角 $\theta_y$ とを定義した制限を行うようにすれば、個々の点光源から発せられる物体光が到達する領域として、X軸方向の長さが $L_x$ 、Y軸方向の長さが $L_y$ の矩形領域が定義されることになる。したがって、原画像10上に定義された全N個のサンプル光源からの物体光について、全く同様に広がり角の制限を行えば、結局、原画像10の情報は、記録面20上に定義された全N個の矩形領域（部分的に重なり合っている）の集合からなる特定の領域内にのみ記録されることになる。このように、原画像上の各サンプル光源から発せられる物体光についての広がり角の制限条件を設定すれば、記録面20上の領域は一義的に定義されることになる。

【0060】本発明を実施する上で定義する必要があるもうひとつの事項は、サンプル光源の位置である。サン

プル光源は、点光源、線光源、面光源のいずれでもかまわないが、ここでは点光源を用いた実施形態のみを述べておく。すべてのサンプル光源を点光源とすれば、原画像上の位置の情報さえ決めてやれば、サンプル光源の定義は完了する（物体光の強度は、当該サンプル光源位置における原画像の輝度や反射率などによって定まる）。ここでは、互いに平行な複数の切断面を利用して、サンプル光源の位置を定義する実施形態を述べる。

【0061】いま、原画像10とXY平面上に位置する記録面20とが、図13に示すように配置されている状態において、原画像10と記録面20との双方を切断することができる複数の切断面を考えてみる。ここでは、各切断面が、いずれもXZ平面に平行な面となるように定義したものとしよう。図13に示す切断面Sjは、これら複数の切断面のうちの第j番目の切断面を示している。原画像10の表面を第j番目の切断面Sjによって切断することにより、図のように、第j番目の切断線Ljが定義される。また、記録面20を第j番目の切断面Sjによって切断することにより、図のように、第j番目の切断線Mjが定義される。ここでは、記録面20側に形成される切断線Mjを、交線Mjと呼ぶことにしよう。こうして、原画像10側に切断線Ljが定義できたら、この切断線Lj上に所定間隔をもいて多数のサンプル光源（点光源）を定義すればよい。

【0062】図14は、このようにして原画像10の表面上に多数のサンプル光源を定義する様子を示す側面図である。図示の例では、全部でJ枚の切断面S1～SJ（いずれもXZ平面に平行）が定義されており、隣接する各切断面はいずれも所定間隔Dを保って配置されている。このようにJ枚の切断面S1～SJを定義すれば、原画像10側には、所定間隔Dを保って配置されたJ本の切断線L1～LJが定義され、記録面20側には、所定間隔Dを保って配置されたJ本の交線M1～MJ（いずれも紙面に垂直）が定義される。そこで、各切断線L1～LJのそれぞれの上に、所定間隔d（直線距離でもよいし、切断線に沿った距離でもよい）で並んだサンプル光源を定義すれば、原画像10の表面上に規則的に多数のサンプル光源を定義することができる。図14に示す例では、第j番目の切断線Lj上に、サンプル光源Pj1, Pj2, Pj3, …が定義されている状態が示されている。これらサンプル光源Pj1, Pj2, Pj3, …のY座標値は、記録面20側の第j番目の交線MjのY座標値に一致する。また、切断線Ljから所定間隔Dだけ下がった位置には、第(j+1)番目の切断面S(j+1)によって形成された第(j+1)番目の切断線L(j+1)が定義され、この切断線L(j+1)上にも所定間隔dで多数のサンプル光源（図示省略）が定義され、これらのサンプル光源のY座標値は、記録面20側の第(j+1)番目の交線M(j+1)のY座標値に一致する。

【0063】本発明の特徴は、サンプル光源の空間的密度を各原画像ごとに変える点にあるが、上述のように切断面を利用してサンプル光源を定義すれば、切断面の配置間隔Dもしくは切断線上でのサンプル光源の配置間隔dを変えることにより、サンプル光源の空間的密度を変えることができる。もっとも、切断面の配置間隔Dは、サンプル光源の縦方向密度を決定する要因となり、切断線上でのサンプル光源の配置間隔dは、サンプル光源の横方向密度を決定する要因となるので、実用上は、両者が連動して変わるようにするのが好ましい（さもないと、再生像の縦方向の解像度と横方向の解像度とが極端に異なるようなケースが生じてしまう）。そこで、本実施形態では、常に、d=D/2となるような設定を行うようにし、切断面の配置間隔Dを決めれば、切断線上でのサンプル光源の配置間隔dが自動的に決まるようになっている。

【0064】このように、所定間隔Dを保ちながら互いに平行になるように配置された複数の切断面を定義し、原画像10の表面を各切断面によって切断することにより得られる切断線上に所定間隔dで並んだサンプル光源を定義するようにすれば、原画像10上に規則的に配置された多数のサンプル光源を容易に定義することができる。しかも、原画像ごとに切断面の間隔Dを変えることによりサンプル光源の空間的密度を変えることができる。切断面の配置間隔Dの実用的な数値としては、肉眼認識可能な原画像については、Dを30μm以上（たとえば、D=80μm）に設定すれば十分であり（30μm未満に設定すると、必要以上の解像度を与えることになり、無駄な演算を行うことになる）、肉眼認識不能な原画像（たとえば、高さ100μm、幅50μmのマイクロ文字）については、Dを30μm未満（たとえば、D=20μm）に設定すればよい（30μm以上に設定すると、マイクロ文字などが十分な解像度で表現されなくなる）。また、切断線上でのサンプル光源の配置間隔dは、上述したように、たとえば、d=D/2となるような設定を行っておけばよい。

【0065】続いて、図14に示すように、複数の切断面を用いて点光源からなるサンプル光源を定義し、個々のサンプル光源から発せられる物体光に具体的な広がり角の制限を課して、記録面20上の各演算点についての干渉波強度演算を行う具体的な実施形態を説明する。図15は、図14の一部分のみを抽出して示した広がり角の設定方法を示す側面図である。この図では、第(j-1)番目の切断面S(j-1)による切断線上に定義された第i番目のサンプル光源P(j-1)i、第j番目の切断面Sjによる切断線上に定義された第i番目のサンプル光源P(j)i、第(j+1)番目の切断面S(j+1)による切断線上に定義された第i番目のサンプル光源P(j+1)iが、それぞれ代表的なサンプル光源として示されている。一方、記録面20上には、第(j-

1) 番目の切断面  $S_{(j-1)}$  との交線  $M_{(j-1)}$  、第  $j$  番目の切断面  $S_j$  との交線  $M_j$  、第  $(j+1)$  番目の切断面  $S_{(j+1)}$  との交線  $M_{(j+1)}$  が、それぞれ黒丸（いずれも紙面に垂直方向に伸びる線になる）で示されている。

【0066】ここで、各交線  $M_{(j-1)}$  ,  $M_j$  ,  $M_{(j+1)}$  について、Y軸方向にそれぞれ幅  $L_y$  をもたせることにより、短冊領域  $T_{(j-1)}$  ,  $T_j$  ,  $T_{(j+1)}$  を定義する。各短冊領域は、各交線を中心線として、Y軸方向の幅が  $L_y$  、X軸方向の幅が記録面20の横幅となるような横方向（X軸方向）に細長い矩形になる。なお、図15では、説明の便宜上、各短冊領域を記録面20の右側に示しているが、実際には、各短冊領域は記録面20上に定義される矩形領域になる。ここで、各短冊領域の幅  $L_y$  を切断面の間隔  $D$  に等しく設定すれば、図示のとおり、記録面20は多数の短冊領域によって隙間なく埋め尽くされることになる。そこで、各サンプル光源から発せられた物体光のY軸方向の広がり角  $\theta_y$  を、物体光の照射領域が1つの短冊領域内に納まるように設定すれば、たとえば、図示の例では、サンプル光源  $P_{(j-1)i}$  からの物体光は、短冊領域  $T_{(j-1)}$  内にのみ到達することになり、サンプル光源  $P_{j i}$  からの物体光は、短冊領域  $T_j$  内にのみ到達することになり、サンプル光源  $P_{(j+1)i}$  からの物体光は、短冊領域  $T_{(j+1)}$  内にのみ到達することになる。

【0067】図16は、原画像10上に定義されたサンプル光源  $P_{j i}$  と記録面20上に定義された短冊領域  $T_j$  との関係を示す斜視図である。ここで、サンプル光源  $P_{j i}$  は、第  $j$  番目の切断面  $S_j$  によって原画像10を切断することによって定義される第  $j$  番目の切断線  $L_j$  上に所定間隔  $d$  で配置された多数のサンプル光源のうちの第  $i$  番目のサンプル光源である。また、短冊領域  $T_j$  は、第  $j$  番目の切断面  $S_j$  と記録面20との交線  $M_j$  にY軸方向の幅  $L_y$  ( $L_y = D$ ) をもたせることにより定義された矩形領域（図にハッチングを施した領域）である。ここで、上述したように、サンプル光源  $P_{j i}$  から発せられる物体光のY軸方向の広がり角を所定の角度  $\theta_y$  に制限すれば、この物体光は、短冊領域  $T_j$  内にのみ到達することになる。図16には示されていないが、切断線  $L_j$  上には、この他にも多数のサンプル光源が定義されることになるが、切断線  $L_j$  上に定義されたすべてのサンプル光源から発せられる物体光が、短冊領域  $T_j$  内にのみ到達する、という条件設定を行えば、干渉波の強度演算の負担は大幅に軽減されることになる。すなわち、第  $j$  番目の短冊領域  $T_j$  内の演算点については、第  $j$  番目の切断線  $L_j$  上に定義されたサンプル光源からの物体光のみを考慮した演算を行えば足りることになる。

【0068】このように、物体光の広がり角を制限した演算を行うと、記録面20上に得られる干渉縞パターンは本来のホログラムパターンにはならず、再生時には正

しい三次元再生像が得られなくなる。たとえば、図15、図16に示す例のように、Y軸方向の広がり角  $\theta_y$  を制限してホログラムを作成した場合、このようなホログラムから得られる再生像は、X軸方向（横方向）に関しては十分な立体視が得られるが、Y軸方向（縦方向）に関しては十分な立体視が得られなくなり、斜め上方や斜め下方から観察した場合に、正しい再生像が得られないことがある。しかしながら、前述したように、偽造防止シールなどの用途に利用するのであれば、一般的な観察方向から観察したときに、ある程度の立体視が可能な再生像が得られれば十分であり、大きな問題は生じない。

【0069】なお、実際に、物体光の広がり角を制限した演算を行う場合、個々のサンプル光源についてそれぞれ広がり角を定義するという作業を行なう必要はない。実際の演算では、まず、記録面20上に個々の短冊領域を定義し、各短冊領域内にそれぞれ演算点を定義し、個々の演算点に関して干渉波の強度演算を行う際に、当該演算点が所属する短冊領域に対応する切断線を認識し、この切断線上に配置されたサンプル光源からの物体光のみを考慮した演算を行う、という作業を行なうだけである。たとえば、図16に示す例では、記録面20上に、各切断面に応じた複数の短冊領域  $T_1$  ,  $T_2$  ,  $\dots$  ,  $T_j$  ,  $\dots$  ,  $T_J$  を定義し、各短冊領域内に多数の演算点を定義し（たとえば、X軸方向のピッチ  $0.6\mu m$  、Y軸方向のピッチ  $0.25\mu m$  でマトリックス状に配置された演算点を定義すればよい）、第  $j$  番目の短冊領域  $T_j$  内の演算点について干渉波の強度演算を行う際には、これに對応する第  $j$  番目の切断線  $L_j$  上に配置されたサンプル光源からの物体光のみを考慮した演算を行うことになる。

【0070】以上、物体光のY軸方向についての広がり角  $\theta_y$  を制限する方法について述べたが、実用上は、図12に示すように、X軸方向についての広がり角  $\theta_x$  についても制限を行い、1つのサンプル光源  $P_i$  からの物体光が、縦  $L_y$  、横  $L_x$  の寸法をもった単位領域  $U_i$  内にのみ到達するような設定を行なうのが好ましい。図17は、このような設定、すなわち、X軸方向広がり角とY軸方向広がり角との双方を制限した場合の物体光の様子を示す上面図である。原画像10を第  $j$  番目の切断面  $S_j$  によって切断して得られた切断線  $L_j$  上には、図示のように、所定間隔  $d$  で多数のサンプル光源が定義される。ここで、物体光のX軸方向広がり角を角度  $\theta_x$  に制限すれば、第  $i$  番目のサンプル光源  $P_{j i}$  からの物体光は、記録面20上の単位領域  $U_{j i}$  内にのみ到達し、第  $(i+3)$  番目のサンプル光源  $P_{j (i+3)}$  からの物体光は、記録面20上の単位領域  $U_{j (i+3)}$  内にのみ到達することになる。図17には示されていないが、同様に、第  $(i+1)$  番目のサンプル光源  $P_{j (i+1)}$  からの物体光は、記録面20上の単位領域  $U_{j (i+1)}$

+1) 内にのみ到達することになり、第(i+2)番目のサンプル光源Pj(i+2)からの物体光は、記録面20上の単位領域Uj(i+2)内にのみ到達することになり、単位領域Uj i, Uj(i+1), Uj(i+2), Uj(i+3)は、部分的に重なりながら少しずつされた領域になる。なお、原画像10の背面に定義された第(i+n)番目のサンプル光源Pj(i+n)からの物体光は、原画像10が透明な物体でない限り無視される(いわゆる隠面処理が行われる)。

【0071】図18は、図17における記録面20を原画像10側から見た正面図である。ここで、交線Mj上に位置する単位領域Uj i, Uj(i+3)は、図17に示すように、切断線Lj上のサンプル光源Pj i, Pj(i+3)からの物体光が到達する単位領域であり、交線M(j+1)上に位置する単位領域U(j+1) i, U(j+1)(i+3)は、所定間隔Dだけ下方に位置する切断線L(j+1)上のサンプル光源P(j+1) i, P(j+1)(i+3)からの物体光が到達する単位領域である。もちろん、記録面20上には、図18に示されていない多数の単位領域が定義されることになり、これらの各単位領域は部分的に重なり合っていることになる。そして、記録面20上の特定の単位領域は、原画像10上の特定のサンプル光源に対応することになる。たとえば、記録面20上の単位領域Uj iは、原画像10上の特定のサンプル光源Pj iに対応している。

【0072】このように、X軸方向広がり角とY軸方向広がり角との双方を制限した場合の演算は、次のようにして行うことができる。すなわち、記録面20上のある1つの演算点に関する干渉波の強度演算を行う際には、当該演算点を含むいくつかの単位領域を認識し、これら単位領域に対応するサンプル光源からの物体光のみを考慮した干渉波の強度演算を行えばよい。

【0073】このような広がり角を制限した演算を行うことにはすれば、たとえば、図7に示すようないくつかの原画像が与えられた場合、図8に示すような領域が自動的に定義されることになる。具体的には、たとえば、原画像110上には、多数のサンプル光源が定義されることになるが、これら原画像110上の個々のサンプル光源からの物体光は、記録面20上のそれぞれ所定の単位領域内にのみ到達することになり、これら単位領域の集合からなる領域が、図8に示す領域 $\alpha$ 10として自動的に定まることになる。

【0074】図16に示すように、Y軸方向の広がり角のみを制限した場合と、図18に示すように、X軸方向広がり角とY軸方向広がり角との双方を制限した場合と、を比較すると、前者では、短冊領域Tj内の全領域に、切断線Ljのすべてのサンプル光源の情報が記録されるのに対し、後者では、部分的に重複している個々の単位領域に、それぞれ1つのサンプル光源の情報が記録

される点が異なっている。ただ、後者の場合も、同一の交線上に並んだ複数の単位領域から構成される細長い領域を短冊領域と呼ぶことにすれば(たとえば、交線Mj上に並んだJ個の単位領域Uj 1, Uj 2, …, Uj i, …, Uj Jから構成される領域を短冊領域Tjと呼ぶことにすれば)、多数の短冊領域をY軸方向に配置することにより構成されているという点で、前者の場合と同じ構成を有することになる。

【0075】以上述べた例は、短冊領域のY軸方向の幅Ly(もしくは、単位領域のY軸方向の幅)を、切断面の間隔Dに等しく設定した例であり、このような設定を行えば、記録面20は、多数の短冊領域をY軸方向に配置することにより埋め尽くされることになる。しかしながら、短冊領域の幅Lyを切断面の間隔Dよりも小さく設定することも可能である。この場合、記録面20上には、短冊領域が定義されていない空隙領域が形成されることになる。図19は、図15に示す広がり角 $\phi$ をより小さく設定した場合の物体光の到達状態を示す側面図である。図19においても、図15に示す例と同様に、記録面20上に短冊領域T(j-1), Tj, T(j+1)が定義されており、これら短冊領域内の演算点については、それぞれ所定の干渉波の強度値が演算されることになる。しかしながら、各短冊領域の幅Lyは、切断面の間隔Dよりも小さく設定されているので(図示の例の場合は、Ly=D/4)、各短冊領域の間に空隙領域が形成されてしまっている。このように、記録面20上に生じた空隙領域には、原画像10上のいずれのサンプル光源からも物体光が到達しないので、当然、干渉波の強度値が得られない。そこで、このように、記録面20上に空隙領域が生じる場合には、この空隙領域については、隣接する短冊領域に関する干渉波の強度演算の結果を複写して利用するようすればよい。

【0076】図20は、空隙領域に対して短冊領域の演算結果を複写する原理を説明するための記録面20の平面図である。図にハッチングを施して示した領域が、短冊領域T(j-1), Tj, T(j+1)であり、これらの間に存在する破線の領域は空隙領域である。干渉波の強度値は、各短冊領域内に分布する演算点についてのみ求まっており、空隙領域については、何ら演算結果は得られていない。そこで、図20において、たとえば、短冊領域T(j-1)の内部について得られた演算結果を、3つの空隙領域 $\phi$ (j-1)の1,  $\phi$ (j-1)の2,  $\phi$ (j-1)の3に複写し、短冊領域Tjの内部について得られた演算結果を、3つの空隙領域 $\phi$ jの1,  $\phi$ jの2,  $\phi$ jの3に複写し、短冊領域T(j+1)の内部について得られた演算結果を、3つの空隙領域 $\phi$ (j+1)の1,  $\phi$ (j+1)の2,  $\phi$ (j+1)の3に複写すれば、記録面20の全面について、干渉波強度の演算結果が求まることになる。

【0077】このような複写を行えば、図20における

グループG(j-1), Gj, G(j+1)の各領域は、いずれも、同一の干渉縞が記録されている短冊領域を4つ連続的に繰り返し配置してなる領域ということになる。もちろん、このような複写を行って作成されたホログラムは、本来のホログラムにはならないため、再生時には本来の三次元再生像は得られなくなるが、空隙領域内に於する演算が全く不要になるため、全体的な演算負担を大幅に軽減させるメリットが得られる。具体的には、たとえば、短冊領域のY軸方向の幅L<sub>y</sub>=1μm程度に設定することができる。

【0078】本発明の特徴は、原画像ごとにサンプル光源の空間的密度を異ならせる、という点にある。そして、サンプル光源の空間的密度は、切断面の間隔Dにより調節できることは、既に述べたとおりである。したがって、上述した空隙領域への複写を行う手法を探る場合には、切断面の間隔Dは、複写の繰り返し数を左右するパラメータになる。たとえば、図19の例では、切断面が間隔Dで配置されていたが、この間隔Dを2倍の間隔DD(DD=2D)にしたとすると、図21に示すような結果が得られる。すなわち、短冊領域T<sub>j</sub>やT(j+1)の幅L<sub>y</sub>に変わりはないものの、空隙領域が広がることになるので、空隙領域に短冊領域内の干渉縞の内容を複写する場合、繰り返し数がそれだけ増加することになる。具体的には、図22に示すように、短冊領域T<sub>j</sub>の内部について得られた演算結果を、7つの空隙領域<sub>j</sub>の1～<sub>j</sub>の7に複写する必要が生じる。その結果、図22におけるグループG<sub>j</sub>の領域は、同一の干渉縞が記録されている短冊領域を8つ連続的に繰り返し配置してなる領域ということになる。

【0079】§4. 本発明に係るホログラム記録媒体これまで、本発明に係る計算機ホログラムの作成方法をいくつかの実施形態について述べてきた。ここでは、これらの方によって作成されるホログラム記録媒体の特徴について述べておく。なお、本明細書における「ホログラム記録媒体」とは、コンピュータを用いた演算によって記録面20上に形成されたホログラム光学パターンを、何らかの物理的媒体上に固定したものを広く意味し、たとえば、電子線描画装置を用いて干渉縞パターンを描画した原版、この原版を用いて作成された複製物、この複製物に反射層などを成膜してなる媒体、などを含むものである。

【0080】本発明に係るホログラム記録媒体の基本的な特徴は、複数の原画像が記録されており、各原画像ごとに、それぞれ別個の異なる記録領域に情報が記録されており、個々の記録領域には、記録対象となる原画像上に定義された多数のサンプル光源から発せられた物体光の情報が記録されており、かつ、少なくとも2つの異なる原画像上のサンプル光源の空間的密度が、互いに異なっている、という点にある。たとえば、図8に示す記録面20上に形成された干渉縞パターンを物理的に固定し

たホログラム記録媒体の場合、合計10個の原画像121～129, 110が記録されており、これらの原画像は、それぞれ別個の記録領域 $\alpha$ 1～ $\alpha$ 10に、多数のサンプル光源から発せられた物体光の情報として記録されており、しかも原画像110上のサンプル光源の空間的密度と、原画像121～129上のサンプル光源の空間的密度とは異なっていることになる。より具体的には、原画像110は肉眼で認識可能な画像であるのに対して、原画像121～129は肉眼で認識不能なマイクロ文字(最大寸法300μm以下の文字)からなる画像となっており、原画像121～129上のサンプル光源の空間的密度は、原画像110上のサンプル光源の空間的密度よりも高くなるような設定がなされている。このように、サンプル光源の空間的密度を変えるためには、既に述べたように、所定間隔Dをもって互いに平行になるような多数の切断面を定義し、この切断面によって形成される切断線上にサンプル光源群を定義するようにし、所定間隔Dを原画像ごとに変えるようにすればよい。具体的には、原画像110のように肉眼認識可能な原画像については、間隔Dを30μm以上間隔に設定して多数の切断面を定義するようにし、原画像121～129のように肉眼認識不能な原画像については、間隔Dを30μm未満の間隔に設定して多数の切断面を定義するようにすればよい。

【0081】また、図20や図22に示す例のように、短冊領域ごとに干渉縞パターンを複写する方法を探って作成されたホログラム記録媒体の場合は、記録面上に同一矩形からなる短冊領域が多数並べて定義され、各短冊領域内には所定の干渉縞が記録されており、かつ、同一の干渉縞が記録されている短冊領域が所定数だけ連続的に繰り返し配置されることになる。もちろん、上述した本発明に係るホログラム記録媒体の基本的な特徴により、記録面上には、各原画像ごとに、それぞれ別個の異なる記録領域が定義されており、同一の干渉縞が記録された短冊領域の連続数が、少なくとも2つの異なる記録領域について互いに異なるという独特の構成を有している。たとえば、高い密度でサンプル光源を定義するため、図19に示すように、所定間隔Dをもった切断面によって切断された原画像を記録するための記録領域では、図20に示すように、同一の干渉縞が記録された短冊領域の連続数が4になるが、低い密度でサンプル光源を定義するため、図21に示すように、所定間隔DDをもった切断面によって切断された原画像を記録するための記録領域では、図22に示すように、同一の干渉縞が記録された短冊領域の連続数が8になる。

【0082】上述のような特徴をもったホログラム記録媒体は、§1～§3で述べた方法で作成することができ、干渉縞パターンを得るための演算負担が軽減されるというメリットを有し、商業的量産を行う上での利便性が向上することになる。

【0083】なお、本発明に係る計算機プログラムの作成方法およびプログラム記録媒体は、回折格子パターンを利用して原画像を記録する手法と組み合わせることも可能であり、たとえば、図8や図10における領域 $\alpha$ 0に、回折格子からなるパターンなどを形成してもよい。あるいは、図7に示されている複数の原画像のうち、4つの原画像121, 123, 127, 129については、干渉縞として記録する代わりに、回折格子パターンとして記録するようなことも可能である。

【0084】§5. 複素振幅情報を記録する手法  
これまで述べた実施形態は、いずれも図1に示す基本原理に従って、物体光と参照光との干渉縞として、原画像の情報を記録面20上に記録していた。しかしながら、計算機プログラムの手法を用いれば、原画像10を、必ずしも参照光Rを用いて干渉縞として記録する必要はなく、原画像10からの物体光そのものを記録面20に直接記録することも可能である。すなわち、光学的にプログラムを作成する場合には、感光性材料からなる記録媒体20上に、感光に必要な一定時間にわたって干渉波を発生させ、これを干渉縞として記録しなければならない。このため、参照光を利用して定在波となる干渉波を発生させる必要がある。ところが、計算機プログラムの手法を利用すれば、記録面20上に存在するある瞬間の波の状態を、あたかも時間を静止させて観測することができ、これを記録することができる。別言すれば、所定の基準時刻における記録面20上の各演算点位置における物体光の振幅および位相（複素振幅情報）を演算によって求めることができ、こうして求めた複素振幅情報を記録面上に記録すれば、原画像10を光学パターンとして記録することができる。このように、原画像10から発せられた物体光の複素振幅情報を記録する手法は、特願2000-265042号明細書に開示されており、本発明に係る技術思想は、このような複素振幅情報を記録する手法にも適用可能である。ここでは、この複素振幅情報を記録する手法の基本原理を簡単に説明しておく。

【0085】いま、たとえば、図23の斜視図に示すように、サンプル光源（点光源）Pと記録面20とが定義されている場合に、記録面20上の演算点Q(x, y)に到達した物体光の振幅と位相がどのように計算されるかを考えてみよう。一般に、振幅と位相とを考慮した波動は、

$$A \cos \theta + i A \sin \theta$$

なる複素関数で表現される（iは虚数単位）。ここで、Aが振幅を示すパラメータであり、θが位相を示すパラメータである。そこで、点光源Pから発せられる物体光を、上記複素関数で定義すれば、演算点Q(x, y)の位置における物体光は、

$$A/r \cdot \cos(\theta + 2\pi r/\lambda) + i A/r \cdot \sin(\theta + 2\pi r/\lambda)$$

なる複素関数で表される。ここで、rは、点光源Pと演算点Q(x, y)との距離であり、λは物体光の波長である。物体光の振幅は距離rが大きくなるにしたがって減衰し、位相は距離rと波長λとの関係で決定される。この複素関数には、時間を示す変数が入っていないが、これは、前述したように、所定の基準時刻において時間を静止させたときに観測される波の瞬間状態を示す式だからである。

【0086】結局、原画像10の情報を記録面20上に記録するには、図24の斜視図に示されているように、原画像10上に多数のサンプル光源、すなわち、点光源P1, P2, …, Pk, …, PKを定義し、記録面20上の各演算点位置において、各点光源から発せられる物体光の合成波の振幅および位相を演算によって求め、これを何らかの方法で記録すればよい。いま、原画像10上に合計K個の点光源が定義され、第k番目の点光源Pkから発せられる物体光が、図24に示すように、

$$A_k \cos \theta_k + i A_k \sin \theta_k$$

なる複素関数で表現されたとしよう。原画像10が、それぞれ所定の階調値（濃度値）をもった画素の集合から構成されていたとすれば、振幅を示すパラメータAkは、当該点光源Pkの位置に存在する画素の階調値に対応して定められる。位相θkは、一般的には、θk=0なる設定でかまわないと、必要に応じて、原画像10の各部から異なる位相の物体光を発せられているような設定を行うことも可能である。全K個の点光源について、それぞれ上記複素関数で表現される物体光が定義できたら、記録面20上の任意の演算点Q(x, y)の位置における全K個の物体光の合成波は、図24に示すようになる。

$$\sum_{k=1}^K (A_k / r_k \cos(\theta_k + 2\pi r_k / \lambda) + i A_k / r_k \sin(\theta_k + 2\pi r_k / \lambda))$$

なる複素関数で表現されることになる。ここで、rkは第k番目の点光源Pkと演算点Q(x, y)との距離である。なお、上述の式は、原画像10を記録媒体の奥に再生させる場合の式に相当する。原画像10を記録媒体の手前側に浮き出すように再生させる場合には、

$$\sum_{k=1}^K (A_k / r_k \cos(\theta_k - 2\pi r_k / \lambda) + i A_k / r_k \sin(\theta_k - 2\pi r_k / \lambda))$$

なる式により複素関数を計算すればよい（位相の項の符号が負になっている）。したがって、両方の場合を考慮した複素関数は、

$$\sum_{k=1}^K (A_k / r_k \cos(\theta_k \pm 2\pi r_k / \lambda) + i A_k / r_k \sin(\theta_k \pm 2\pi r_k / \lambda))$$

となる。この関数の実数部をRx y、虚数部をIx yとして、Rx y + iIx yなる形にすれば、この合成波の演算点Q(x, y)の位置における複素振幅（位相を考

慮した振幅)は、図25に示すように、複素座標平面上における座標点Vで示されることになる。結局、演算点Q(x, y)における物体光合成波の振幅は、図25に示す座標平面における原点Oと座標点Vとの距離A(x, y)で与えられ、位相はベクトルOVと実数軸とのなす角度θ(x, y)で与えられることになる。

【0087】かくして、記録面20上に定義された任意の演算点Q(x, y)位置における物体光合成波の振幅A(x, y)と位相θ(x, y)とが、計算によって求められることになる。したがって、記録面20上には、原画像10から発せられる物体光の複素振幅分布(物体光合成波の振幅および位相の分布)が得られる。こうして得られた複素振幅分布を、何らかの形で物理的な記録媒体上に記録し、所定の再生照明光を与えたときに、物体光の波面が再生されるようにすれば、原画像10をホログラムとして記録できることになる。

【0088】記録面20上に原画像10から発せられる物体光の複素振幅分布を記録するためには、三次元セルを用いることができる。三次元セルを用いて複素振幅分布を記録し、原画像10をホログラムとして記録するには、次のような手順を行えばよい。まず、たとえば、図26に示すように、記録面20の位置に、三次元仮想セル集合30を定義する。この三次元仮想セル集合30は、所定寸法をもったブロック状の仮想セルを縦横に並べることにより、セルを二次元的に配列したものである。ここで、個々の仮想セル内に、それぞれ1つの演算点が存在するようになる。演算点の位置は、セル内の任意の1点でかまわないと、ここでは、セル前面(原画像10に向かい合った面)の中心点位置に当該セルの演算点がくるようにする。たとえば、三次元仮想セル集合30の前面(原画像10に向かい合った面)にXY座標系を定義し、この座標系における座標(x, y)の位置にある演算点Q(x, y)をもつ仮想セルを、仮想セルC(x, y)と呼ぶことにすれば、この仮想セルC(x, y)の前面の中心点に演算点Q(x, y)がくることになる。要するに、1つの演算点の近傍に、それぞれ1つの仮想セルが配置されるようにすればよい。

【0089】一方、原画像10上には、既に述べたように、多數のサンプル光源が定義される。図26に示す例では、原画像10は、K個の点光源P1, P2, …, Pk, …, PKの集合として定義されている。これら各点光源からは、それぞれ所定の振幅および位相をもった物体光が発せられ、演算点Q(x, y)には、これら物体光の合成波が到達することになる。この合成波の複素振幅は、前述した式により計算することができ、図25に示す複素座標平面上における座標点Vとして示され、この座標点Vに基づいて、振幅A(x, y)と位相θ(x, y)が得られることは既に述べたとおりである。ここでは、演算点Q(x, y)について得られた振幅A(x, y)および位相θ(x, y)を、当該演算点Q(x,

y)についての特定振幅A(x, y)および特定位相θ(x, y)と呼ぶこととする。

【0090】以上の手順は、実際にはコンピュータを用いた演算処理として実行されることになる。結局、この演算処理により、すべての演算点について、それぞれ特定振幅と特定位相とを求めることができ、三次元仮想セル集合30を構成するすべての仮想セルについて、それぞれ特定振幅と特定位相とを求めることができる。そこで、これら個々の仮想セルをそれぞれ実体のある物理セルに置き換えるれば、三次元物理セルの集合からなる光学素子(原画像10が記録されたホログラム記録媒体)が作成できる。ここで、仮想セルに取って代わる物理セルは、仮想セルに定義されている特定振幅および特定位相に応じて、入射光の振幅および位相を変調することができるような光学的特性を有している必要がある。別言すれば、置き換えた個々の物理セルは、所定の入射光を与えたときに、置換前の仮想セルに定義されていた特定振幅および特定位相に応じて、この入射光の振幅および位相を変化させることにより射出光を生み出す機能をもった特定の光学的特性を有している必要がある。

【0091】このような特定の光学的特性をもった物理セルの集合からなる光学素子に対して、所定の再生用照明光(理想的には、上記演算処理において用いた物体光波長入と同じ波長をもった単色光平面波)を照射すれば、個々の物理セルでは、再生用照明光が特定振幅および特定位相によって変調されるので、もとの物体光の波面が再生されることになる。かくして、この光学素子に記録されていたホログラムが再生されることになる。

【0092】続いて、上述した物理セルの具体的な構成について述べる。基本的には、この物理セルは、三次元の立体セルであり、それぞれ特定振幅および特定位相が定義されており、個々のセルに所定の入射光を与えると、当該セルに定義された特定振幅および特定位相に応じて入射光の振幅および位相を変化させた射出光が得られるような特定の光学的特性を有していれば、どのような構成のセルでもかまわない。要するに、演算点Q

(x, y)に配置される三次元セルC(x, y)については、特定振幅A(x, y)および特定位相θ(x, y)が記録されるようにし、このセルに振幅Ain、位相θinなる入射光Linが与えられた場合には、振幅Aout = Ain · A(x, y)、位相θout = θin ± θ(x, y)なる射出光Loutが得られるようすればよい。入射光の振幅Ainは、セルに記録されていた特定振幅A(x, y)による変調を受けて振幅Aoutに変化し、入射光の位相θinは、セルに記録されていた特定位相θ(x, y)による変調を受けて位相θoutに変化することになる。

【0093】三次元セル内において振幅を変調する一つの方法は、セル内に特定振幅に応じた透過率をもった振幅変調部を設けておく方法である(セル全体を振幅変調

部として用いてもよいし、セルの一部分に振幅変調部を設けるようにしてもよい）。たとえば、透過率がZ%の振幅変調部をもったセルは、 $A(x, y) = Z/100$ なる特定振幅が記録されているセルとして機能し、振幅Ainをもった入射光がこのセルを通過すると、 $A_{out} = A_{in} \cdot Z/100$ なる振幅をもった射出光に振幅変調されることになる。個々の三次元セルの透過率を任意の値に設定するには、たとえば、着色剤の含有率をそれぞれ変えることにより対応することができる。

【0094】三次元セル内において振幅を変調する別な方法は、セル内に特定振幅に応じた反射率をもった振幅変調部を設けておく方法である。たとえば、反射率がZ%の振幅変調部をもったセルは、 $A(x, y) = Z/100$ なる特定振幅が記録されているセルとして機能し、振幅Ainをもった入射光がこの振幅変調部で反射して射出したとすれば、 $A_{out} = A_{in} \cdot Z/100$ なる振幅をもった射出光に振幅変調されることになる。個々の三次元セルの反射率を任意の値に設定するには、たとえば、セル内に反射面を用意しておき（この反射面が振幅変調部として機能することになる）、この反射面の反射率を任意の値に設定すればよい。具体的には、たとえば、反射面の表面粗さを変えることにより、反射光と散乱光との割合を調節することができるので、この表面粗さを調節することにより、任意の反射率をもったセルを用意することが可能になる。

【0095】三次元セル内において振幅を変調する更に別な方法は、セル内に特定振幅に応じた有効面積をもった振幅変調部を設けておく方法である。たとえば、入射光の全入射領域の面積を100%としたときに、このうちのZ%の有効面積をもった部分に入射した入射光だけから物体像の再生に有効な射出光が得られるような構造からなる振幅変調部をもったセルは、 $A(x, y) = Z/100$ なる特定振幅が記録されているセルとして機能する。すなわち、振幅Ainをもった入射光がこの振幅変調部に入射光としても、そのうちのZ%の光だけが有効な射出光として出て行くことになるので、 $A_{out} = A_{in} \cdot Z/100$ なる振幅をもった射出光に振幅変調されたことになる。このような特定の有効面積をもった領域部分のみから有効な射出光を得るには、物理的な凹凸構造をもったセルを用いればよい。

【0096】一方、三次元セル内において位相を変調する一つの方法は、セル内に特定位相に応じた屈折率をもった位相変調部を設けておく方法である（セル全体を位相変調部として用いてもよいし、セルの一部分に位相変調部を設けるようにしてもよい）。たとえば、屈折率がn1の材料からなる位相変調部をもったセルと、屈折率がn2の材料からなる位相変調部をもったセルとでは、同一位相をもった入射光を与えて、それぞれ射出光の位相に差が生じることになる。したがって、屈折率の異なる種々の材料からセルを構成するようにすれば、入射

光に対して任意の位相変調を施すことが可能になる。

【0097】三次元セル内において位相を変調する別な方法は、セル内に特定位相に応じた光路長をもった位相変調部を設けておく方法である（セル全体を位相変調部として用いてもよいし、セルの一部分に位相変調部を設けるようにしてもよい）。たとえば、屈折率nをもった同一材料からなる位相変調部をもったセルであっても、この位相変調部の光路長が異なれば、同一位相をもった入射光を与えて、それぞれ射出光の位相に差が生じることになる。たとえば、第1のセルに設けられた位相変調部の光路長がL、第2のセルに設けられた位相変調部の光路長が2Lであったとすると、同一位相をもった入射光が与えられたとしても、第1のセルからの射出光に比べて、第2のセルからの射出光は、屈折率nをもった材料中を進んだ距離が2倍になるので、それだけ大きな位相差が生じていることになる。任意の光路長をもった位相変調部を実現するには、物理的な凹凸構造をもったセルを用いればよい。

【0098】このように、特定振幅に基づく振幅変調機能をもった三次元セルや、特定位相に基づく位相変調機能をもった三次元セルは、いくつかの方法によって実現可能であり、上述したいくつかの振幅変調方法および位相変調方法のうちから、任意の方法を選択することができる。たとえば、振幅変調方法として、セル内に特定振幅に応じた透過率をもった振幅変調部を設けておく方法を探り、位相変調方法として、セル内に特定位相に応じた屈折率をもった位相変調部を設けておく方法を探り、セル全体を振幅変調部および位相変調部として用いるのであれば、図27の表に示されているような16通りの物理セルを選択的に配列することにより、光学素子を形成することができる。この表の横軸は振幅A、縦軸は位相θに対応しており、振幅Aおよび位相θとともに、4つのレンジに分けられている。

【0099】ここで、振幅Aが「0～25%」に対応するレンジに描かれたセル（表の第1列目のセル）は、透過率が非常に低い材料からなるセルであり、振幅Aが「25～50%」に対応するレンジに描かれたセル（表の第2列目のセル）は、透過率がやや低い材料からなるセルであり、振幅Aが「50～75%」に対応するレンジに描かれたセル（表の第3列目のセル）は、透過率がやや高い材料からなるセルであり、振幅Aが「75～100%」に対応するレンジに描かれたセル（表の第4列目のセル）は、透過率が非常に高い材料からなるセルである。一方、位相θが「0～π/2」に対応するレンジに描かれたセル（表の第1行目のセル）は、空気に対し非常に近い屈折率n1をもつ材料からなるセルであり、位相θが「π/2～π」に対応するレンジに描かれたセル（表の第2行目のセル）は、空気よりやや大きい屈折率n2をもつ材料からなるセルであり、位相θが「π～3π/2」に対応するレンジに描かれたセル（表の第3行

目のセル)は、空気よりかなり大きい屈折率n3をもつ材料からなるセルであり、位相θが「3π/2～2π」に対応するレンジに描かれたセル(表の第4行目のセル)は、空気より非常に大きい屈折率n4をもつ材料からなるセルである。

【0100】このように、図27に示す例では、4通りの透過率、4通りの屈折率をもった合計16個のセルが用意されているが、より高い精度で振幅と位相をセルに記録するには、透過率および屈折率のステップを更に細かく設定し、より多数種類のセルを用意すればよい。このような16通りの物理セルを用いて仮想セルを置き換えるには、個々の仮想セルに定義された特定振幅および特定位相による変調を行うために必要とされる光学的特性に最も近い光学的特性を有する物理セルを選択すればよい。

【0101】図28は、別な方法により振幅変調および位相変調を行うことが可能な物理セルC(x, y)の構造の一例を示す斜視図である。図示のとおり、この三次元物理セルは、ほぼ直方体のブロック状をしており、その上面には、溝G(x, y)が形成されている。この例では、物理セルC(x, y)の寸法は、図において、C1=0.6μm、C2=0.25μm、C3=0.25μmであり、溝G(x, y)の寸法は、G1=0.2μm、G2=0.05μm、G3=C3=0.25μmである。このような構造をもった物理セルC(x, y)を用いれば、振幅の情報は、溝G(x, y)の横方向の幅G1の値として記録することができ、位相の情報は、溝G(x, y)の深さG2の値として記録することができる。これは、物理セルC(x, y)の内部と外部の空気とにおいて屈折率が異なり、溝G(x, y)の内部の面S1に垂直に入射した光L1と、溝G(x, y)の外部の面S2に垂直に入射した光L2とについて、外部空間を行進する際に光路差が生じるためである。したがって、特定振幅および特定位相が定義された仮想セルを、このような構造をもった物理セルで置き換える際には、特定振幅に応じた寸法G1を有し、特定位相に応じた寸法G2を有する物理セルによって置き換えを行うようすればよい。

【0102】図28に示すような溝G(x, y)をもった物理セルC(x, y)では、溝の幅G1および深さG2は連続的に変化させることができるので、理論的には、無限種類の物理セルを用意することができる。このような無限種類の物理セルを用いれば、仮想セルに定義された特定振幅に応じた正確な溝幅G1をもち、特定位相に応じた正確な深さG2をもった物理セルによって、当該仮想セルを置き換えることが可能である。しかしながら、実用上は、a通りの溝幅、b通りの深さを予め定め、合計a×b通りの物理セルを用意しておき、これらの物理セルの中から必要とされる光学的特性が最も近い物理セルを選択するのが好ましい。図29は、7通

りの溝幅と、4通りの深さとを定め、合計28通りの物理セルを用意した例を示す斜視図である。この28通りの物理セルは、いずれも図28に示す形態をしたブロック状の物理セルであり、図29には、これらの物理セルを4行7列の行列状に配置した状態が示されている。

【0103】この図29に示された行列の7つの列は、振幅Aのバリエーションを示し、4つの行は、位相θのバリエーションを示している。たとえば、列W1に位置するセルは、振幅Aの最小値に対応するセルであり、溝幅G1=0、すなわち、溝Gが全く形成されていないセルになっている。列W2～W7へと右側へ移動するにしたがって、より大きな振幅Aに対応するセルとなっており、溝幅G1は徐々に広がっている。列W7に位置するセルは、振幅Aの最大値に対応するセルであり、溝幅G1=セル幅C1、すなわち、全面が掘られたセルになっている。また、この図29に示された行列の行に着目すると、たとえば、行V1に位置するセルは、位相θの最小値に対応するセルであり、溝の深さG2=0、すなわち、溝Gが全く形成されていないセルになっている。行V2～V4へと下側へ移動するにしたがって、より大きな位相θに対応するセルとなっており、溝の深さG2は徐々に大きくなっている。

【0104】以上、物体光の複素振幅情報を記録する手法の基本原理を簡単に述べたが、この手法は、要するに、個々の演算点位置において、物体光と参照光との干渉波強度を演算する代わりに、物体光の複素振幅を演算する、というものである。したがって、§1～§4で述べた実施形態において、干渉波強度を演算する代わりに複素振幅を演算することにすれば、サンプル光源の定義方法など、本発明の本質的な技術思想に関しては何ら変わることはない。この§5で述べた物体光の複素振幅情報を記録する手法を用いても、本発明を実施することができる。

### 【0105】

【発明の効果】以上のとおり本発明によれば、マイクロ文字などの微細なパターンを含む原画像についてのホログラムを演算により作成する場合に、コンピュータの演算負担を軽減させることができるようになる。

### 【図面の簡単な説明】

【図1】一般的なホログラムの作成方法を示す原理図であり、原画像10を記録面20上に干渉縞として記録する方法が示されている。

【図2】一般的な計算機ホログラムの作成方法を示す原理図であり、記録面20上の演算点Q(x, y)について、干渉波強度を演算する方法が示されている。

【図3】肉眼で認識可能な通常の大きさの原画像11と、肉眼では認識不能なマイクロ文字からなる原画像12とを、計算機ホログラムの手法を用いて記録面20上に記録する方法を示す原理図である。

【図4】記録面20を領域分割して、個々の領域ごとに

異なる原画像11, 12を記録する方法を示す原理図である。

【図5】本発明のより具体的な実施形態に用いられる原画像を示す正面図であり、図(a)には肉眼認識可能な立体像からなる原画像、図(b)には肉眼認識不能なマイクロ文字からなる原画像が示されている。

【図6】図5に示す原画像を記録面20の後方に配置した状態を示す側面図である。

【図7】図6に示す原画像の配置を、記録面20側から観察した正面図である。

【図8】図7に示す原画像を記録するために、記録面20上に定義された領域を示す正面図である。

【図9】図5に示す原画像を、別なグループ単位で把握した状態を示す正面図である。

【図10】図9に示すグループ単位の把握に応じて、記録面20上に定義された領域を示す正面図である。

【図11】原画像10上のサンプル光源Piから発せられる物体光の広がり角を制限する原理を示す側面図である。

【図12】原画像10上のサンプル光源Piから発せられる物体光の広がり角を制限する原理を示す斜視図である。

【図13】原画像10および記録面20を切断面で切断した状態を示す斜視図である。

【図14】原画像10の表面上に多数のサンプル光源を定義する様子を示す側面図である。

【図15】図14の一部分のみを抽出して示した広がり角の設定方法を示す側面図である。

【図16】原画像10上に定義されたサンプル光源と記録面20上に定義された短冊領域との関係を示す斜視図である。

【図17】X軸方向広がり角とY軸方向広がり角との双方を制限した場合の物体光の様子を示す上面図である。

【図18】図17における記録面20を原画像10側から見た正面図である。

【図19】図15に示す広がり角θyをより小さく設定した場合の物体光の到達状態を示す側面図である。

【図20】図19に示す例において、空隙領域に対して短冊領域の演算結果を複写する原理を説明するための記録面20の平面図である。

【図21】図19に示す切断面の間隔Dをより広げた場合の物体光の到達状態を示す側面図である。

【図22】図21に示す例において、空隙領域に対して短冊領域の演算結果を複写する原理を説明するための記録面20の平面図である。

【図23】サンプル光源Pと記録面20とが定義されている場合に、記録面20上の演算点Q(x, y)に到達した物体光の振幅と位相を示す斜視図である。

【図24】原画像10上の各サンプル光源から発せられる物体光が、記録面20上の演算点Q(x, y)に到達

した場合の演算点Q(x, y)の位置における物体光の複素振幅を示す斜視図である。

【図25】複素座標平面上の座標点Vで示される複素振幅に基づいて、振幅A(x, y)と位相θ(x, y)が求まることを示す図である。

【図26】原画像10を記録するために定義された三次元仮想セル集合30の一例を示す斜視図である。

【図27】本発明で利用可能な物理セルのバリエーションを示す図である。

【図28】本発明で利用可能な物理セルC(x, y)の構造の一例を示す斜視図である。

【図29】図28に示す物理セルC(x, y)の構造において、7通りの溝幅と、4通りの深さとを定め、合計28通りの物理セルを用意した例を示す斜視図である。

#### 【符号の説明】

10…原画像

11…肉眼でパターンが認識可能な原画像

12…肉眼でパターンが認識不能な原画像（マイクロ文字）

20…記録面

30…三次元仮想セル集合

110…肉眼でパターンが認識可能な原画像

120…画像平面

121～129…肉眼でパターンが認識不能な原画像（マイクロ文字）

130…画像平面

131～133…肉眼でパターンが認識不能な原画像（マイクロ文字）

A, Ak, A(x, y)…振幅

C(x, y)…仮想セル／物理セル

C1, C2, C3…セルの寸法

D, DD…切断面の配置間隔

d…同一切断線上に定義されたサンプル光源の配置間隔  
G(j-1), Gj, G(j+1)…短冊領域の集合からなるグループ

G1, G2, G3…溝の寸法

G(x, y)…セルに形成された溝

Ixy…複素振幅の虚数部

Lx…単位領域のX軸方向の幅

Ly…単位領域または短冊領域のY軸方向の幅  
Lj…切断面Sjによって原画像10を切断して得られる切断線

L(j+1)…切断面S(j+1)によって原画像10を切断して得られる切断線

M(j-1)…切断面S(j-1)と記録面20との交線

Mj…切断面Sjと記録面20との交線

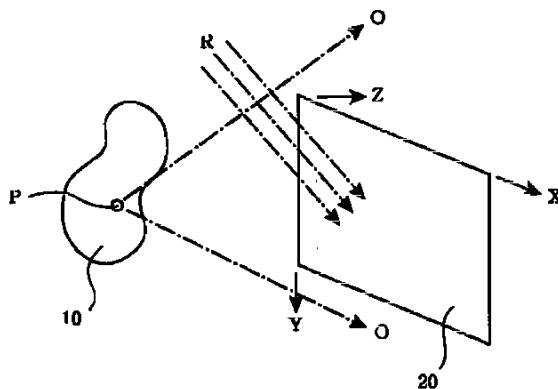
M(j+1)…切断面S(j+1)と記録面20との交線

O, O1, Oi, ON…物体光

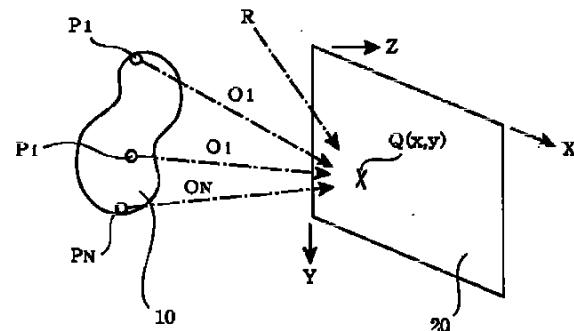
P, P1, Pi, Pk, PK, PN…サンプル光源  
 P11-1, P11-2, P11-3…原画像11上のサンプル光源  
 P12-1, P12-2, P12-3…原画像12上のサンプル光源  
 Pj1, Pj2, Pj3, Pji, Pj(i+1), Pj(i+2), Pj(i+3), Pj(i+n)…切断線Lj上のサンプル光源  
 P(j-1)i…切断面S(j-1)によって生じた切断線上の第i番目のサンプル光源  
 Pji…切断面Sjによって生じた切断線Lj上の第i番目のサンプル光源  
 P(j+1)i…切断面S(j+1)によって生じた切断線上の第i番目のサンプル光源  
 Q(x, y)…座標(x, y)上の演算点  
 R…参照光  
 Rx y…複数振幅の実数部  
 r, r1, rk, rK…点光源からの距離  
 S1, S2, S(j-1), Sj, S(j+1), SJ…XZ平面に平行な切断面／物理セルの面  
 T(j-1)…交線M(j-1)に幅をもたせることに

より定義された短冊領域  
 Tj…交線Mjに幅をもたせることにより定義された短冊領域  
 T(j+1)…交線M(j+1)に幅をもたせることにより定義された短冊領域  
 Uji…サンプル光源Pjiに対応した単位領域  
 Uj(i+3)…サンプル光源Pj(i+3)に対応した単位領域  
 U(j+1)i…サンプル光源P(j+1)iに対応した単位領域  
 U(j+1)(i+3)…サンプル光源P(j+1)(i+3)に対応した単位領域  
 V…座標点  
 V1~V4…位相θに応じた行  
 W1~W7…振幅Aに応じた列  
 α1~α10…記録面20上に定義された領域  
 φ○○…空隙領域  
 θ, θ(x, y)…位相  
 θx…物体光のX軸方向に関する広がり角  
 θy…物体光のY軸方向に関する広がり角  
 λ…光の波長

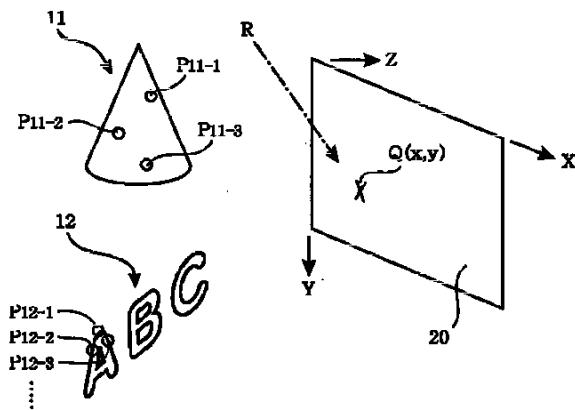
【図1】



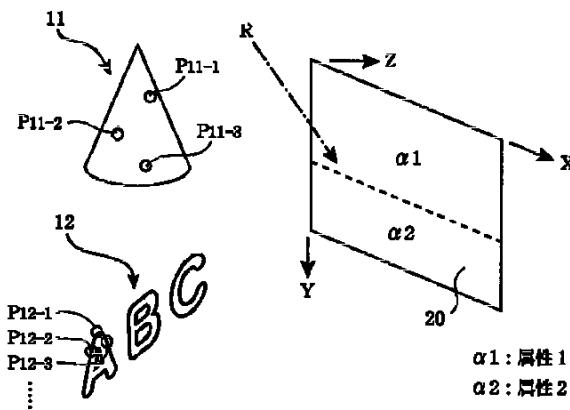
【図2】



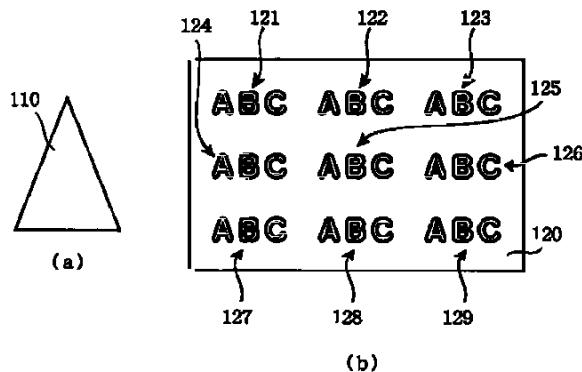
【図3】



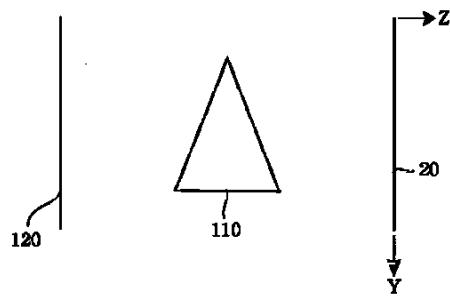
【図4】



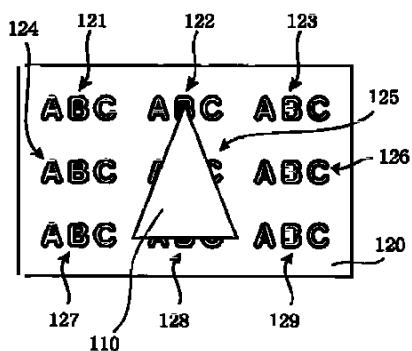
【図5】



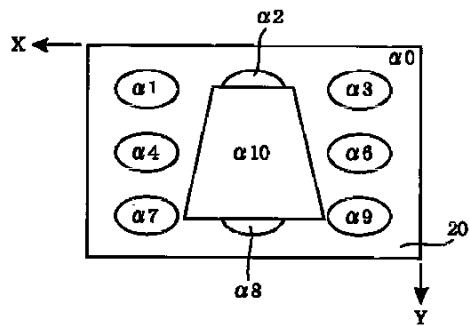
【図6】



【図7】

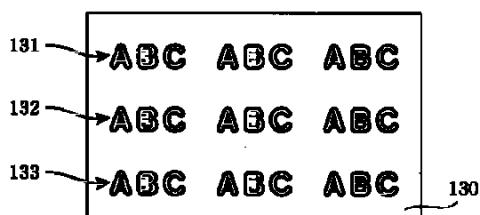


【図8】

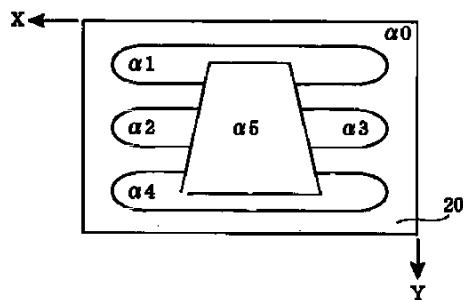


$\alpha 0$ : 無属性  
 $\alpha 1$ : 属性 1 (原画像121)  
 $\alpha 2$ : 属性 2 (原画像122)  
 $\alpha 3$ : 属性 3 (原画像123)  
 $\alpha 4$ : 属性 4 (原画像124)  
 $\alpha 5$ : 属性 5 (原画像125)  
 $\alpha 6$ : 属性 6 (原画像126)  
 $\alpha 7$ : 属性 7 (原画像127)  
 $\alpha 8$ : 属性 8 (原画像128)  
 $\alpha 9$ : 属性 9 (原画像129)  
 $\alpha 10$ : 属性 10 (原画像110)

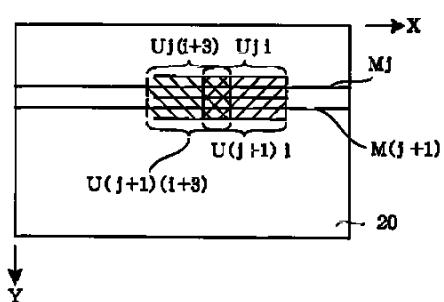
【図9】



【図10】

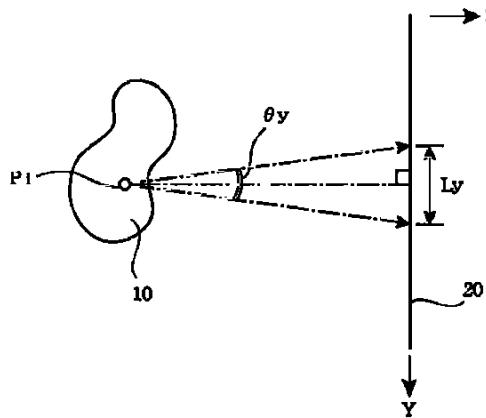


【図18】

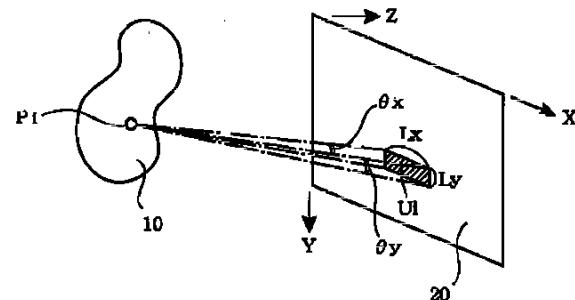


$\alpha 0$ : 無属性  
 $\alpha 1$ : 属性 1 (原画像131)  
 $\alpha 2$ : 属性 2 (原画像132)  
 $\alpha 3$ : 属性 2 (原画像132)  
 $\alpha 4$ : 属性 3 (原画像133)  
 $\alpha 5$ : 属性 4 (原画像110)

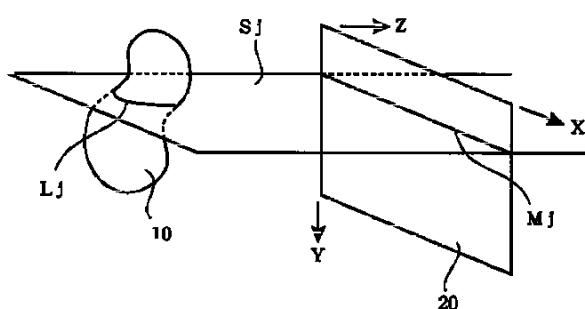
【図11】



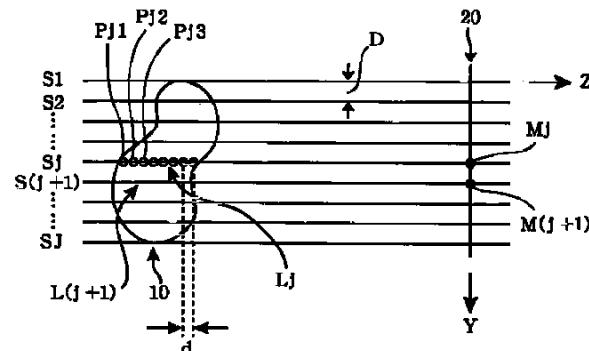
【図12】



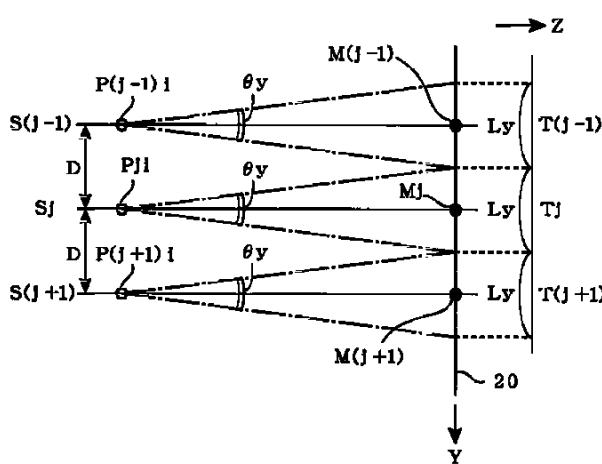
【図13】



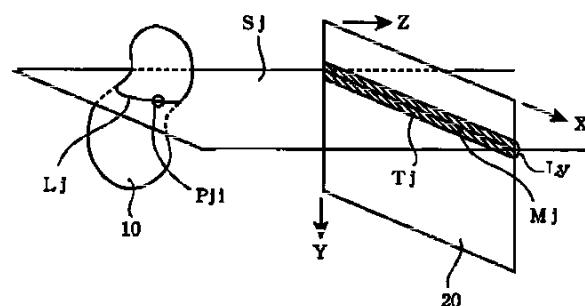
【図14】



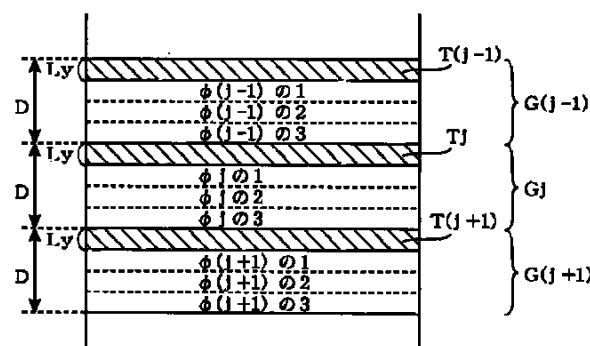
【図15】



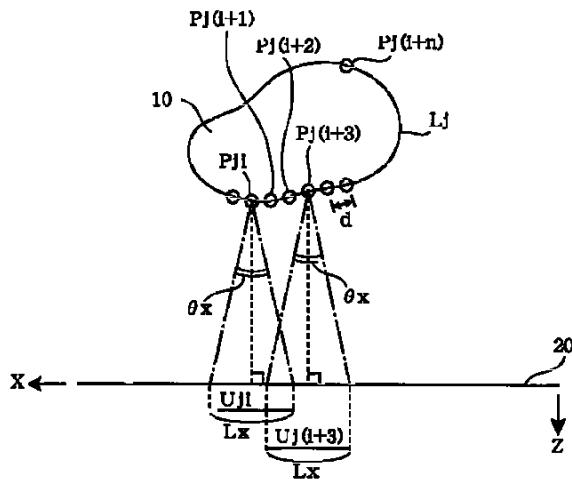
【図16】



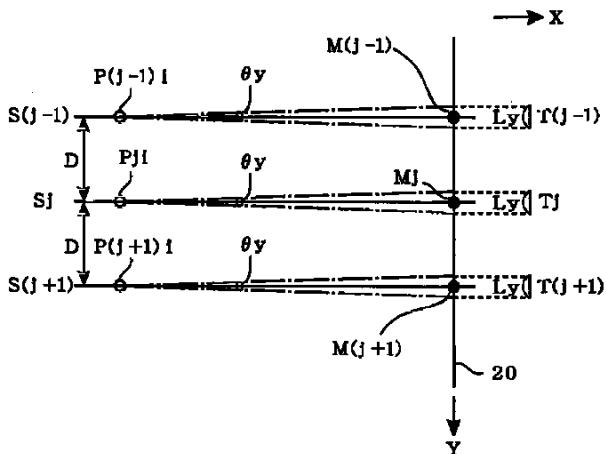
【図20】



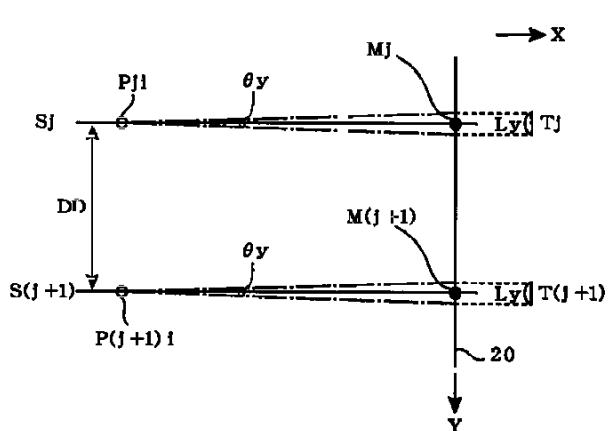
【図17】



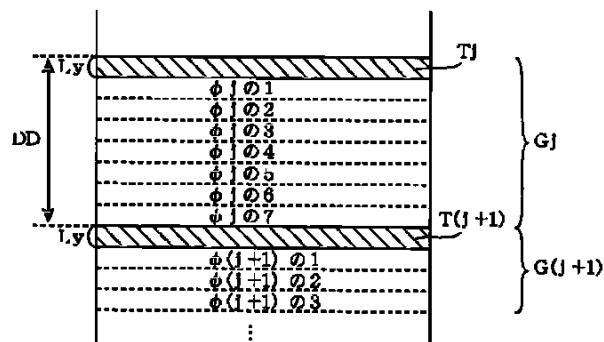
【図19】



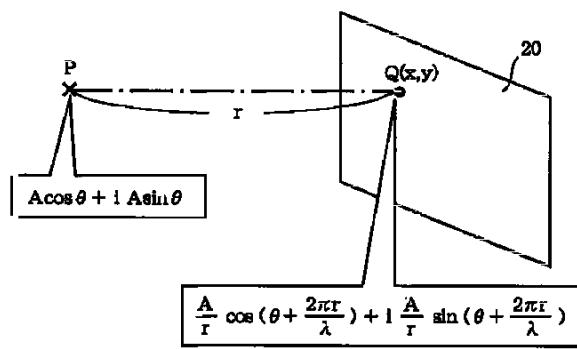
【图21】



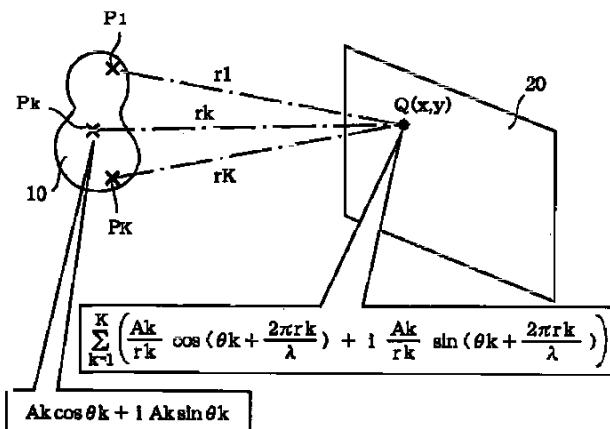
【図22】



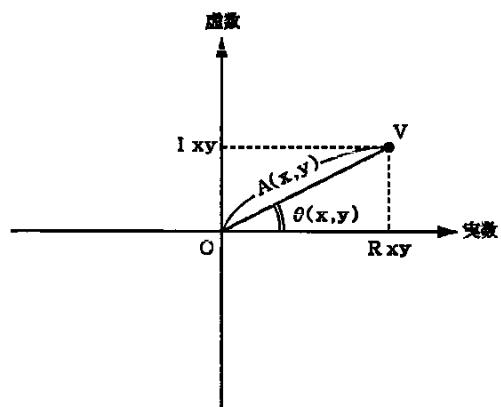
【图23】



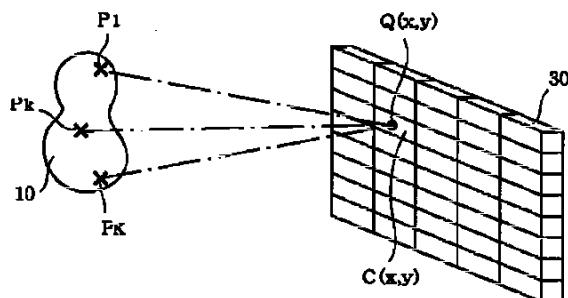
【图24】



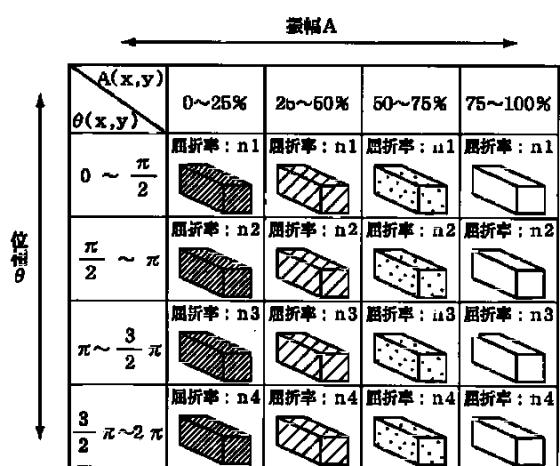
【図25】



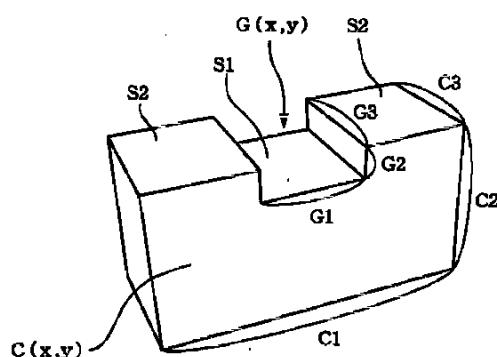
【図26】



【図27】



【図28】



【図29】

